

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SÔNIA MARIA ASSUNÇÃO VERONEZE

**Caracterização de filamentos de compósito PP/serragem
para aplicação na moldagem de peças plásticas
revestidas por Al ou Cu através do processo de aspersão
térmica**

**CURITIBA
2015**

SÔNIA MARIA ASSUNÇÃO VERONEZE

**Caracterização de filamentos de compósito PP/serragem
para aplicação na moldagem de peças plásticas
revestidas por Al ou Cu através do processo de aspersão
térmica**

Tese apresentada como requisito parcial à
obtenção de grau de Doutor. Área de
concentração: Engenharia e Ciência dos
Materiais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE.
Setor de Tecnologia, Universidade Federal
do Paraná.

Orientadora: Prof^a Dr. Thais Helena
Sydenstricker Flores-Sahagun

Co-Orientador: Prof^o Dr. Ramón Sigifredo
Cortés Paredes

CURITIBA

2015

V549c

Veroneze, Sônia Maria Assunção

Caracterização de filamentos de compósito PP/ serragem para aplicação na moldagem de peças plásticas revestidas por Al ou Cu através do processo de aspersão térmica/ Sônia Maria Assunção Veroneze. – Curitiba, 2015.
163 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, 2015.

Orientador: Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun – Co-orientador: Ramón Sigifredo Cortés Paredes.
Bibliografia: p. 154-163.

1. Compósitos poliméricos. 2. Revestimento de metal. 3. Aspersão térmica. 4 Moldagem. I. Universidade Federal do Paraná. II.Flores-Sahagun, Thais Helena Sydenstricker. III. Paredes, Ramón Sigifredo Cortés . IV. Título.

CDD: 670

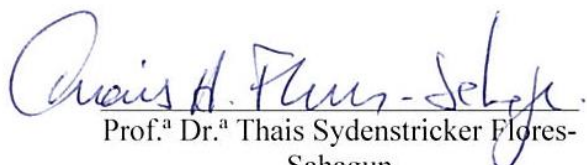



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais
Setor de Tecnologia

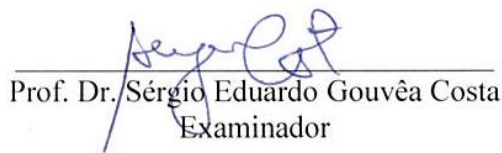
RELATÓRIO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

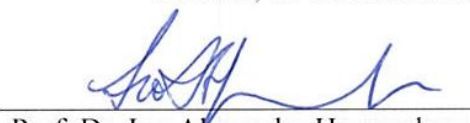
Aos vinte e oito dias do mês de outubro de 2015, na Sala PG Mec 02, no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. de Oliveira, coordenadora do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a septuagésima oitava defesa de tese de doutorado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Thais Sydenstricker Flores-Sahagun (UFPR), Ivo Alexandre Hummelgen (UFPR), Aguinaldo dos Santos (UFPR), Osiris Cancigleri Jr. (PUC/PR), Sérgio Eduardo Gouvêa Costa (PUC/PR). Às 13:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata **SÔNIA MARIA ASSUNÇÃO VERONEZE** a fazer a apresentação da tese de doutorado intitulada **“CARACTERIZAÇÃO DE FILAMENTOS DE COMPÓSITOS PP/SERRAGEM PARA APLICAÇÃO NA MOLDAGEM DE PEÇAS PLÁSTICAS REVESTIDAS POR Al OU Cu ATRAVÉS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA”**. O referido trabalho teve a co-orientação do Prof. Dr. Ramon S. C. Paredes. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a tese e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

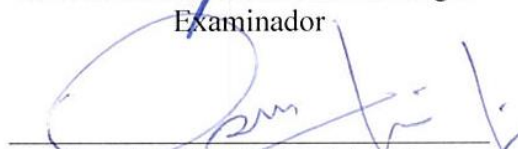
Curitiba, 28 de outubro de 2015.

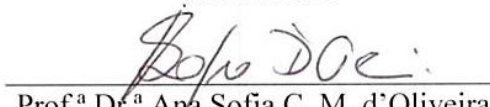

Prof.^a Dr.^a Thais Sydenstricker Flores-
Sahagun
Orientador


Prof. Dr. Aguinaldo dos Santos
Examinador


Prof. Dr. Sérgio Eduardo Gouvêa Costa
Examinador


Prof. Dr. Ivo Alexandre Hummelgen
Examinador


Prof. Dr. Osiris Cancigleri Jr.
Examinador


Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. d'Oliveira
Coordenadora do PIPE

Dedico esta tese a minha mãe, Lourdes, ao meu pai,
Lourivaldo e a minha irmã, Ana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela oportunidade de cursar este Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais, e também pela força que me concedeu para que fosse possível concluí-lo.

A meus pais, que sempre priorizaram e valorizaram a educação acadêmica minha e da minha irmã.

A minha irmã pela incansável ajuda e paciência.

A minha orientadora prof.^a dr.^a Thais Helena Sydenstricker Flores-Sahagun pelo repasse de valiosas experiências e conhecimentos adquiridos em sua carreira, e por sua compreensão e apoio.

Ao meu co-orientador prof.^o dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes, por, além de repassar conhecimento, me orientar com atenção e paciência.

Ao prof.^o dr. Ivo A. Hümmelgen e ao Rafael Rodrigues, pela realização do ensaio de perfilometria.

Ao prof.^o dr. Irineu Mazzaro pela realização do ensaio de difratometria de raios-X.

Aos colegas Lucas Santos e Felipe Jedyn pela ajuda no processamento do compósito e pelos materiais e conhecimentos repassados a mim.

Ao Gustavo Bavaresco pela deposição de alumínio e cobre sobre os filamentos e peças apresentados nesta tese.

Ao LACTEC pela realização de ensaios de MEV e tração.

À Companhia Paranaense de Energia – COPEL –, por parte do meu gerente Paulo Ramos, pela ajuda e compreensão que tornaram possível aliar doutorado e vida profissional. E aos meus colegas de trabalho pelo incentivo e apoio.

À Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de cursar este doutorado.

A todos os meus professores, amigos e colegas de Doutorado.

Porque, quem é Deus senão o
Senhor
E quem é rochedo senão o
nosso Deus?

Deus é o que me cinge de força
e aperfeiçoa o meu caminho.

Livro de Salmos 18: 31-32

RESUMO

Esta tese apresenta um estudo sobre filamentos de compósitos obtidos por extrusão e preparados com polipropileno, um compatibilizante polimérico, e serragem. Foi desenvolvido um novo processo de moldagem que utiliza filamentos viscosos de polímeros oriundos de uma extrusora para a confecção de peças que podem ou não ser perfis. Com o objetivo principal de revestir os filamentos com Al ou Cu através do processo de aspersão térmica à chama, foi necessário analisar algumas características do compósito tais como absorção de água, homogeneidade, resistência mecânica e degradação das fibras de madeira. Outros dois parâmetros analisados foram a flexibilidade dos filamentos, avaliada através da quantidade de fibra de madeira utilizada, e o uso de diferentes temperaturas de aquecimento do compósito durante o processo de fabricação. A pesquisa desenvolvida tem característica exploratória e o método de pesquisa foi o quase experimento, tendo sido realizadas três etapas de confecção de filamentos. Corpos de prova foram avaliados através de ensaios de tração, dobramento, densidade relativa, absorção de água, perfilometria, difratometria de raios-X, e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados alcançados demonstraram que 5% p/p de madeira é a quantidade mais adequada a ser utilizada nos compósitos analisados, pois confere maior flexibilidade aos filamentos que são utilizados na forma viscosa para a confecção de peças. Os ensaios de tração e de dobramento mostraram que a utilização de serragem pode reforçar o material e facilitar a deposição dos revestimentos metálicos através do processo de aspersão térmica. A análise no MEV da superfície de fratura de corpos de prova confirmou que a exposição a temperaturas mais elevadas, porém, abaixo do ponto de degradação das fibras, favorece a redução de poros no compósito e a consequente absorção de água. Foi possível realizar a deposição de alumínio sobre os filamentos, o que não aconteceu, forma satisfatória, com o cobre. Algumas peças plásticas foram produzidas e revestidas com Al para avaliação do potencial do método de moldagem e da aparência final dos produtos que podem ser usados em aplicações decorativas, artísticas e de uso geral.

Palavras-Chave: Filamentos viscosos; madeira plástica; revestimentos metálicos; aspersão térmica; processo de moldagem.

ABSTRACT

In this thesis it is presented a study about composites filaments obtained through extrusion, prepared with polypropylene, a polymeric compatibilizer and saw-dust. It was developed a new molding process that uses viscous polymer filaments that came from an extruder to prepare pieces that can or not consist of profiles. With the aim objective of coating the filaments with Al or Cu using the flame thermal spray process, it was necessary to analyze characteristics of the composites such as water intake, homogeneity, mechanical strength and degradation of the wood fibers. Other parameters that were analyzed were flexibility of the filaments, evaluation of the amount of fibers used and different heating temperatures of the composites during its preparation. The research developed has an exploratory characteristic and the research method used was the quasi-experiment, having been used three stages for the filaments preparation. Specimen were evaluated in tensile tests, bending, relative density determination, water intake, profilometry, crystallinity index through x-ray diffraction patterns and scanning electronic microscopy (SEM). The results obtained showed that 5 wt% of fiber wood is the best amount of reinforcing agent to be used in the composites because of the flexibility conferred to them, considering that they are used in the viscous form during the pieces molding. Strength and bending tests showed that the use of saw-dust may reinforce the material and facilitate the metallic coatings through thermal spray process. The SEM surface fracture analysis of specimen confirmed that the exposition to higher temperatures, however, lower than the degradation temperature of fibers, favors the reduction of porous in the composite and the consequent water absorption. It was possible to coat the filaments with Al but the Cu coating was not satisfactory. Some plastic pieces were molded and coated with Al for evaluation of the molding method and of the final appearance of the products that may be used in decorative, artistic or general purposes.

keywords: Viscous filaments; plastic wood; metal coatings; thermal spraying; molding process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

GRÁFICO 1: UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS POR SETOR	25
FIGURA 1: ESTRUTURA QUÍMICA DO POLIPROPILENO.....	31
FIGURA 2: a) ESTRUTURA QUÍMICA DO ANIDRIDO MALEÍCO. b) FUNCIONALIZAÇÃO DO PP COM ANIDRIDO MALEICO	33
FIGURA 3: ATUAÇÃO DO COMPATIBILIZANTE NO SISTEMA FIBRA/MATRIZ.....	34
FIGURA 4: a) COMPÓSITO SEM ADIÇÃO DE COMPATIBILIZANTE PEMA. b) COMPÓSITO COM ADIÇÃO DE COMPATIBILIZANTE PEMA	35
FIGURA 5: a) COMPÓSITO COM ADIÇÃO DE COMPATIBILIZANTE PPMA. b) COMPÓSITO SEM ADIÇÃO DE COMPATIBILIZANTE PPMA.....	35
FIGURA 6: CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS NATURAIS	36
FIGURA 7: ESTRUTURA QUÍMICA DA CELULOSE.....	37
FIGURA 8: a) IMAGEM DE MEV DE COMPÓSITO ANTES DA ABSORÇÃO DE ÁGUA. b) IMAGEM DE MEV DE COMPÓSITO APÓS A ABSORÇÃO DE ÁGUA	39
FIGURA 9: ESQUEMA DO PROCESSO DE EXTRUSÃO.....	40
FIGURA 10: ESQUEMA PROCESSO DE INJEÇÃO	41
FIGURA 11: ESQUEMA PROCESSO DE TERMOFORMAÇÃO	42
FIGURA 12: ESQUEMA PROCESSO DE TERMOFORMAÇÃO	43
FIGURA 13: a) PANQUECA DEPOSITADA SOBRE SUBSTRATO À TEMPERATURA AMBIENTE. b) PANQUECAS DE ALUMÍNIO DEPOSITADAS SOBRE SUBSTRATO COM PREAQUECIMENTO PELO PROCESSO DE AT POR ARCO ELÉTRICO.....	45
FIGURA 14: MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO DEPOSITADO PELO PROCESSO DE ARCO ELÉTRICO	46
FIGURA 15: CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA.....	47
FIGURA 16: ESQUEMA DO PROCESSO DE PLASMA	48
FIGURA 17: ESQUEMA DO PROCESSO DE POR ARCO ELÉTRICO	49
FIGURA 18: ESQUEMA DA PISTOLA COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME	50

FIGURA 19: ESQUEMA DA PISTOLA COM ALIMENTAÇÃO DE PÓ	50
FIGURA 20: ESQUEMA DA PISTOLA HVOF A QUAL UTILIZA O MECANISMO VENTURI PARA ELEVAR A VELOCIDADE DAS PARTÍCULAS ASPERGIDAS	51
FIGURA 21: PROCESSO COLD SPRAY	52
FIGURA 22: RESULTADO DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA SERRAGEM	59
FIGURA 23: ESQUEMA DAS TRÊS ETAPAS DE FABRICAÇÃO DOS FILAMENTOS ...	62
FIGURA 24: a) EXTRUSORA MONOROSCA - TECK TRIL MODELO EMT 25. b) GRANULADORA	63
FIGURA 25: ESQUEMA PARA COMPARAÇÃO DO PROCESSAMENTO ENTRE A SEGUNDA E A TERCEIRA ETAPA DESTA PESQUISA	64
FIGURA 26: FASES DESENVOLVIDAS NA TERCEIRA ETAPA.....	65
FIGURA 27: PROCESSO DE RETIRADA DE ÁGUA.....	66
FIGURA 28: a) MÁQUINA DE DOBRAMENTO UNIVERSAL. b) CORPO DE PROVA ACOMODADO ENTRE APOIOS E CUTELO DA MAQUINA DE DOBRAMENTO	70
FIGURA 29: FILAMENTOS SENDO PRODUZIDOS EM EXTRUSORA TECK TRILL EMT	73
FIGURA 30: a) CORPO DE PROVA DEFINIDO PELA NORMA MB-4 DA ABNT PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO. b) CORPO DE PROVA UTILIZADO NESTA TESE PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO	75
FIGURA 31: ESQUEMA DO USO DA QUANTIDADE E FORMA DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DA SEGUNDA ETAPA.....	76
FIGURA 32: FIBRAS REVESTIDAS E GRANULADAS	78
FIGURA 33: MISTURA MANUAL DAS FIBRAS REVESTIDAS GRANULADAS COM O PP VIRGEM	79
FIGURA 34: a) INÍCIO DA EXTRUSÃO DOS FILAMENTOS SEM A PRESENÇA DE FIBRA DE MADEIRA. b) FILAMENTO COM GRANDE CONCENTRAÇÃO DE FIBRAS DE MADEIRA	79

FIGURA 35: MATERIAL GRANULADO APÓS O PRIMEIRO PROCESSAMENTO COM PP VIRGEM DEMONSTRA DISTRIBUIÇÃO DESIGUAL DAS FIBRAS DE MADEIRA AO LONGO DO FILAMENTO	80
FIGURA 36: DIFERENTE TONALIDADE ENTRE OS FILAMENTOS TRATADOS A 60°C E A 120°C.....	81
FIGURA 37: ESQUEMA DOS ENSAIOS REALIZADOS NA TERCEIRA ETAPA.....	82
FIGURA 38: FABRICAÇÃO DE UM BALDE UTILIZANDO FILAMENTOS E MOLDE PLÁSTICO. a) MOLDAGEM MANUAL DA BASE DO BALDE. b) INICIO DA MOLDAGEM DA LATERAL DO BALDE. c) FINALIZAÇÃO DO BALDE FORMADO COM FILAMENTOS VISCOSOS. d) PRODUÇÃO DE APOIO PARA PANELA SEM USO DE MOLDE	83
FIGURA 39: a) EQUIPAMENTO PARA ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA. b) CÂMARA PARA JATEAMENTO ABRASIVO	84
FIGURA 40: PISTOLA USADA NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA.....	85
FIGURA 41: a) ARGORA FIXA EM UMA MORSA. b) ARGOLA E FILAMENTO PREPARADOS PARA ASPERSÃO TÉRMICA.....	86
FIGURA 42: a) FILAMENTOS RECEBENDO REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO. b) FILAMENTOS REVESTIDOS. c) ARGOLA PREPARADA PARA RECEBER A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO. d) ARGOLA RECEBENDO DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO .	87
FIGURA 43: a) PREPARAÇÃO DO FILAMENTO PARA RECEBER A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO. b) FILAMENTO PRESO NAS EXTREMIDADES PARA EVITAR MOVIMENTAÇÃO DURANTE A ASPERSÃO TÉRMICA.....	88
FIGURA 44: UTILIZAÇÃO DE ARRUELA PARA FIXAÇÃO DO FILAMENTO	88
FIGURA 45: FILAMENTO RECEBENDO A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO DE FORMA MANUAL.....	89
FIGURA 46: FASES DESENVOLVIDAS NA TERCEIRA ETAPA PARA A ASPERSÃO TÉRMICA, CONSIDERANDO A APLICAÇÃO DE ALUMÍNIO E COBRE EM COMPÓSITOS SUBMETIDOS À TEMPERATURAS DE 60°C E 120°C.....	89
FIGURA 47: EQUIPAMENTO PARA APOIO DOS FILAMENTOS QUE RECEBERÃO REVESTIMENTO ATRAVÉS DE ASPERSÃO TÉRMICA.....	91

FIGURA 48: a) PISTOLA FICOU A UMA DISTÂNCIA DE 30cm DO FILAMENTO. b) A PISTOLA PERMANECEU ALINHADA COM O FILAMENTO DURANTE A APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO	91
FIGURA 49: PEÇA EM FORMATO DE BALDE FIXADA NO SISTEMA PREPARADO PARA APLICAÇÃO DE ALUMÍNIO E COBRE.....	92
FIGURA 50: PEÇA EM FORMATO DE BALDE RECEBENDO A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO	92
FIGURA 51: TRAMAS REALIZADAS COM FILAMENTOS DE POLÍMERO VIRGEM	93
FIGURA 52: a) PEÇA CONFECCIONADA COM 20% p/p DE MADEIRA. b) PULSEIRA CONFECCIONADA COM 20% p/p DE MADEIRA	94
FIGURA 53: a) APOIO CONFECCIONADO COM 10% p/p DE MADEIRA. b) PEÇA FORMADA COM 10% p/p DE MADEIRA.....	94
FIGURA 54: a) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA E ARGOLA COM 20% p/p DE MADEIRA APÓS DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO. b) PEÇA COM 10% p/p DE MADEIRA APÓS A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO	95
FIGURA 55: a) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA NO INÍCIO DO ENSAIO DE DOBRAMENTO. b) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA REVESTIDO COM ALUMÍNIO NO INÍCIO DO ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	96
FIGURA 56: a) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA AOS 11 s DO ENSAIO DE DOBRAMENTO, JÁ APRESENTANDO SINAIS DE ROMPIMENTO. b) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA COM REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO, AOS 11 s DE ENSAIO, SEM INDICAR SINAL DE FRATURA	96
FIGURA 57: a) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA NO MOMENTO DA FRATURA – 25 s. b) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA, REVESTIDOS COM ALUMÍNIO, NO MOMENTO DO ROMPIMENTO – 40 s	97
FIGURA 58: FILAMENTOS PARA CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS NA SEGUNDA ETAPA DE PROCESSAMENTO.....	97
FIGURA 59: COMPARAÇÃO ENTRE FILAMENTO REVESTIDO COM ALUMÍNIO E ARAME DE ALUMÍNIO UTILIZADO NA ASPERSÃO TÉRMICA	98

FIGURA 60: a) FILAMENTOS COM 5% p/p DE MADEIRA 1s ANTES DO ROMPIMENTO. b) FILAMENTOS COM 10% p/p DE MADEIRA 1 s ANTES DO ROMPIMENTO.....	99
FIGURA 61: a) FILAMENTOS COM 5% p/p DE MADEIRA APÓS AQUECIMENTO EM ESTUFA A 50°C. b) FILAMENTOS COM 10% p/p DE MADEIRA DEPOIS DE ACONDICIONADOS EM ESTUFA A 50°C	100
FIGURA 62: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA REVESTIDO EM ALUMÍNIO E COM DOBRAMENTO TOTAL. b) CORPOS DE PROVA ANALISADOS NO ENSAIO DE DOBRAMENTO	101
FIGURA 63: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA APÓS AQUECIMENTO POR 20 min EM ESTUFA A 120°C. b) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA APÓS 20 min EM ESTUFA A 120°C	102
FIGURA 64: CORPOS DE PROVA ENSAIADOS E COM DOBRAMENTO TOTAL	102
GRÁFICO 2: TENSÃO NA CARGA MÁXIMA	106
GRÁFICO 3: TENSÃO NA CARGA MÁXIMA REPRESENTADA NA FORMA DE LINHA	107
GRÁFICO 4: TENSÃO DE TRAÇÃO NA RUPTURA	107
GRÁFICO 5: TENSÃO DE TRAÇÃO NA RUPTURA REPRESENTADO NA FORMA DE LINHA.....	108
GRÁFICO 6: COMPARAÇÃO ENTRE TENSÃO NA CARGA MÁXIMA E TENSÃO NA RUPTURA	108
GRÁFICO 7: MÓDULO DE ELASTICIDADE (YOUNG)	110
GRÁFICO 8: MÓDULO DE ELASTICIDADE (YOUNG) REPRESENTADO NA FORMA DE LINHAS.....	111
GRÁFICO 9: MÓDULO DE ELASTICIDADE (YOUNG) - COMPARAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS	111
GRÁFICO 10: DEFORMAÇÃO	112
GRÁFICO 11: DEFORMAÇÃO REPRESENTADA EM FORMA DE LINHAS.....	113
GRÁFICO 12: DEFORMAÇÃO - COMPARAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS	113

FIGURA 65: a) IMAGEM VISUALIZADA ATRAVÉS DO MEV COM AMPLIAÇÃO DE 50 X, INDICANDO A PRESENÇA DE BAIXA ADESÃO DAS FIBRAS NA MATRIZ. b) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 150 X, CONFIRMANDO A EXISTÊNCIA DE FIBRA DE MADEIRA SOLTA NA MATRIZ.....	114
FIGURA 66: a) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 50 X ATRAVÉS DO MEV DEMOSTRA POROS NO COMPÓSITO COM 10% p/p DE MADEIRA APÓS DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO. b) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 100 X ATRAVÉS DO MEV MOSTRANDO DETALHE DOS POROS E DAS FIBRAS DE MADEIRA MAIS ADERIDAS À MATRIZ .	115
FIGURA 67: a) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 150 X NO MEV DE FRATURA DE COMPÓSITO AQUECIDO A 60°C. b) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 150 X NO MEV DE FRATURA DE COMPÓSITO AQUECIDO EM 120°C	116
FIGURA 68: a) SUPERFÍCIE DE FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA COM AMPLIAÇÃO APROXIMADA DE 50 X NO MEV. b) IMAGEM DA SUPERFÍCIE DE FILAMENTO COM AMPLIAÇÃO DE 245 X NO MEV APRESENTANDO VÁRIOS POROS	117
FIGURA 69: a) REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO SOBRE SUBSTRATO DE COMPÓSITO COM 5% p/p DE MADEIRA. b) IMAGEM DE MEV DO REVESTIMENTO EM ALUMÍNIO SOBRE SUBSTRATO DE FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA	117
FIGURA 70: a) BORDA COM PERDA DE REVESTIMENTO NOS FILAMENTOS COM 5% p/p DE MADEIRA. b) REVESTIMENTO NOS FILAMENTOS COM 10% p/p DE MADEIRA	118
FIGURA 71: ANÁLISE DOS ELEMENTOS QUÍMICOS DA AMOSTRA COM 10% p/p DE MADEIRA REVESTIDA COM ALUMÍNIO	119
GRÁFICO 13: CRISTALINIDADE PARA COMPÓSITO DA SEGUNDA ETAPA.....	120
FIGURA 72: a) BALDE E PEÇAS DE APOIO PRODUZIDOS COM FILAMENTOS VISCOSOS. b) PEÇA PARA DECORAÇÃO PRODUZIDA ATRAVÉS DE FILAMENTOS VISCOSOS.....	121
FIGURA 73: EFEITO DA ASPERSÃO DE ALUMÍNIO SOBRE PEÇA COM 5% DE MADEIRA DA TERCEIRA ETAPA	122
FIGURA 74: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA QUE RECEBEU A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO SEM ANTES PASSAR POR LIMPEZA DE SUPERFÍCIE. b) FILAMENTO	

COM 5% p/p DE MADEIRA QUE FOI LIMPO ANTES DE RECEBER A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO	123
FIGURA 75: BALDE PRODUZIDO POR FILAMENTOS COM 5% p/p DE MADEIRA, REVESTIDO COM ALUMÍNIO.....	123
FIGURA 76: a) EFEITO DA ASPERSÃO DE COBRE SOBRE PEÇA E FILAMENTO COM 5% DE MADEIRA, APÓS SEREM LIMPOS COM ÁLCOOL ETÍLICO. b) DETALHE MOSTRANDO A DEPOSIÇÃO DE COBRE APENAS NOS VALES DA PEÇA PLANA E EM PARTE DO FILAMENTO.....	124
FIGURA 77: a) FILAMENTO QUE TEVE O SUSBTATO LIMPO COM ÁLCOOL ETÍLICO APÓS RECEBER DEPOSIÇÃO DE COBRE. b) FILAMENTO QUE RECEBEU O JATEAMENTO ABRASIVO ANTES DA ASPERSÃO DE COBRE	125
FIGURA 78: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA APÓS REVESTIMENTO EM ALUMÍNIO. b) EFEITO DA ASPERSÃO DE COBRE SOBRE CAMADA DE ALUMÍNIO EM PEÇA COM 5%p/p DE MADEIRA.....	126
FIGURA 79: ENSAIO DE DOBRAMENTO DE FILAMENTO COM 5% p/p DE FIBRAS DE MADEIRA E TRATADOS EM ESTUFA A 60°C, COM 24 h DE ESTUFA NO FINAL - J .	127
FIGURA 80: a) ENSAIO DE DOBRAMENTO DE FILAMENTO COM 5% p/p DE FIBRAS DE MADEIRA, MANTIDO A 120°C DURANTE PROCESSO DE FABRICAÇÃO E PERMANECENDO POR 8 h NA ESTUFA NO FINAL – L. b) FRATURA DO CORPO DE PROVA “L”	127
FIGURA 81: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE FIBRAS DE MADEIRA E TRATADO EM ESTUFA A 120°C DURANTE ENSAIO DE DOBRAMENTO. b) FILAMENTO TRATADO EM ESTUDA A 120°C ARESENTANDO DOBRAMENTO TOTAL	128
FIGURA 82: a) FILAMENTO DA ETAPA “M” DURANTE ENSAIO DE DOBRAMENTO JÁ APRESENTAVA TRINCAS NO REVESTIMENTO. b) FILAMENTO ROMPEU EM UM TEMPO MÉDIO DE 36 s.....	128
FIGURA 83: a) IMAGEM DAS FIBRAS REVESTIDAS COM PPMA COM AMPLIAÇÃO DE 100 X NO MEV. b) IMAGEM DAS FIBRAS REVESTIDAS COM AMPLIAÇÃO DE 400 X NO MEV	132

FIGURA 84: a) FILAMENTO APÓS O PROCESSAMENTO DAS FIBRAS REVESTIDAS COM O PP, DEPOIS DE TRATADO EM TEMPERATURA A 60°C, COM AMPLIAÇÃO DE 100 X ATRAVÉS DO MEV. b) FILAMENTO COM AMPLIAÇÃO DE 400 X NO MEV.....	132
FIGURA 85: a) FILAMENTO APÓS O PROCESSAMENTO DAS FIBRAS REVESTIDAS COM O PP, APÓS TRATADAS EM TEMPERATURA DE 120°C, COM AMPLIAÇÃO DE 100 X. b) IMAGEM DE FILAMENTO TRATADO EM TEMPERATURA DE 120°C, COM AMPLIAÇÃO DE 400 X, INDICA MATERIAL MAIS HOMOGÊNEO.....	133
FIGURA 86: a) FILAMENTO APÓS O REPROCESSAMENTO, SENDO TRATADO EM TEMPERATURA A 60°C, COM AMPLIAÇÃO DE 100 X NO MEV. b) FILAMENTO COM AMPLIAÇÃO DE 400 X NO MEV.....	134
FIGURA 87: a) FILAMENTO APÓS O REPROCESSAMENTO DAS FIBRAS REVESTIDAS COM O PP, E APÓS TRATADAS EM TEMPERATURA A 120°C, COM AMPLIAÇÃO DE 100 X.....	134
FIGURA 88: a) SUBSTRATO DO FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA DA TERCEIRA ETAPA DE FABRICAÇÃO, COM AMPLIAÇÃO DE 400 X NO MEV. b) SUBSTRATO DE FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA DA SEGUNDA ETAPA DE FABRICAÇÃO, COM AMPLIAÇÃO DE 250 X NO MEV.....	135
FIGURA 89: a) REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO NO SUBSTRATO POLIMÉRICO COM AMPLIAÇÃO DE 100 X NO MEV. b) REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO EM IMAGEM AMPLIADA EM 400 X NO MEV	136
FIGURA 90: a) REVESTIMENTO DE COBRE NO SUBSTRATO POLIMÉRICO COM AMPLIAÇÃO DE 100 X. b) REVESTIMENTO DE COBRE EM SUBSTRATO POLIMÉRICO COM AMPLIAÇÃO DE 400 X	136
GRÁFICO 14: CRISTALINIDADE PARA COMPÓSITO DA TERCEIRA	137

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPARAÇÃO ENTRE FIBRAS NATURAIS E FIBRAS SINTÉTICAS	29
TABELA 2: PROPRIEDADES DO POLIPROPILENO DA MARCA BRASKEN H 503	60
TABELA 3: COMPOSIÇÃO DOS COMPATIBILIZANTES TESTADOS NESTE TRABALHO	61
TABELA 4: CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO NA EXTRUSÃO REATIVA	61
TABELA 5: ÍNDICE DE FLUIDEZ DAS AMOSTRAS DE PP, PPMA COMERCIAL E PPMA F2 E F5.....	61
TABELA 6: VALORES PARA A MISTURA COM 5% DE MADEIRA	74
TABELA 7: VALORES PARA A MISTURA COM 10% DE MADEIRA	74
TABELA 8: PERFIL DE TEMPERATURA DA EXTRUSORA	75
TABELA 9: COMPOSIÇÃO DA MISTURA FIBRAS/ COMPATIBILIZANTE	77
TABELA 10: COMPOSIÇÃO INICIAL DA MISTURA PARA O COMPÓSITO.....	78
TABELA 11: DIFERENÇA DE MASSA DO COMPÓSITO APÓS TRATAMENTO TÉRMICO	81
TABELA 12: AMOSTRAS DE FILAMENTOS QUE RECEBERAM ALUMÍNIO.....	90
TABELA 13: DENSIDADE EXPERIMENTAL E TEÓRICA DO COMPÓSITO PRODUZIDO	103
TABELA 14: ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS FILAMENTOS DA SEGUNDA ETAPA	105
TABELA 15: DESVIO PADRÃO PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO.....	109
TABELA 16: RESULTADOS DE Ra e Rq	120
TABELA 17: DENSIDADE EXPERIMENTAL E TEÓRICA DO COMPÓSITO PRODUZIDO NA TERCEIRA ETAPA	129
TABELA 18: ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS FILAMENTOS DA TERCEIRA ETAPA.....	130
TABELA 19: RESULTADOS DE Ra e Rq	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
Al – Alumínio
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
C – Carbono
CO₂ – Gás Carbônico
CS – *Spray frio*
Cu – Cobre
CVD – Vapor químico
DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica
FS – *Flame Spray*
FMR (Flow Meter Reading) – % de fluxo máximo
H – Hidrogênio
HVOF – Plasma SprayHigh Velocity Oxygen Fuel
K – Parâmetro *Sommerfeld*
LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
MDF – *Medium-Density Fiberboard*
Mesh – Unidade de medida utilizada para a abertura de malha da tela
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MF – Melamina Formaldeído
MFI – Índice de Fluidez
MO – Microscopia Ótica
MOE – Módulo de Elasticidade
MOR – Módulo de Ruptura
NBR – Norma Brasileira Registrada
O₂ – Oxigênio
PE – Polietileno
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PEMA – Polietileno Maleatado
PLA – Poli(ácido láctico)
PP – Polipropileno
PPMA – Polipropileno Maleatado
Psi – Unidade padrão de pressão
PVC – Cloreto de Polivinila
PVD – Vapor físico
Ra – rugosidade média
Rq – Rugosidade média quadrática
Scfh – (*Standard cubic feet per hour*) – normal pé cúbico por hora
TGA – Termogravimetria
UF – Uréia Formaldeído
UFPR – Universidade Federal do Paraná
UV – Ultravioleta
WPC – *Wood-Plastic-Composite*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 PROBLEMA	21
1.2 OBJETIVOS	22
1.3 HIPÓTESES	22
1.4 JUSTIFICATIVA	23
1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA	25
1.6 VISÃO GERAL DO MÉTODO DE PESQUISA	26
1.7 ESTRUTURA DA TESE	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1 COMPÓSITOS MADEIRA/ PLÁSTICO	28
2.2 POLÍMERO POLIPROPILENO	30
2.3 COMPATIBILIZANTE	31
2.4 FIBRAS VEGETAIS	36
2.5 A INFLUÊNCIA DA UMIDADE NO COMPÓSITO MADEIRA/PLÁSTICO	38
2.6 PROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICO	39
2.6.1 Extrusão	39
2.6.2 Injeção	40
2.6.3 Termoformação	41
2.6.4 Rotomoldagem	42
2.6.5 APLICAÇÃO NESTA TESE	43
2.7 ASPERSÃO TÉRMICA	44
2.7.1 Propriedades	44
2.7.2 Processos	46
2.7.2.1 Plasma	48
2.7.2.2 Arco Elétrico	48
2.7.2.3 Processos a chama: Chama convencional e chama HVOF	49
2.7.2.4 Processo de pulverização a frio (<i>Cold Spray</i>)	51
2.7.3 Aspersão Térmica em Compósito	52
3 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	57

4 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	58
4.1 MÉTODO DE PESQUISA	58
4.2 MATERIAIS	59
4.2.1 Fibras de Madeira	59
4.2.2 Polipropileno	60
4.2.3 Compatibilizante	60
4.3 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS	62
4.3.1 Preparação dos Filamentos	62
4.3.2 Controle da Temperatura dos Compósitos	64
4.3.3 Controle da Umidade das Fibras de Madeira e nos Compósitos	65
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	66
4.4.1 Caracterização Mecânica por Ensaios de Tração	67
4.4.2 Caracterização Física por Microscopia Eletrônica de Varredura	67
4.4.3 Caracterização dos compósitos por Densidade Relativa	67
4.4.4 Densidade dos Filamentos	68
4.4.5 Absorção de Água no Compósito	69
4.4.6 Ensaio de Dobramento	69
4.4.7 Análise por Difratometria de Raios-X	71
4.4.8 Análise dos Revestimentos metálicos dos Filamentos de Compósitos	71
4.4.9 Caracterização Microestrutural do Revestimento	71
5 APLICAÇÃO	72
5.1 FABRICAÇÃO DOS FILAMENTOS	72
5.1.1 Características Gerais	72
5.1.2 Fabricação dos Filamentos na Primeira Etapa	72
5.1.3 Fabricação dos Filamentos na Segunda Etapa	73
5.1.4 Fabricação dos Filamentos na Terceira Etapa	76
5.2 PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA NOS CORPOS DE PROVA	84
5.2.1 Características Gerais	84
5.2.2 Aspersão Térmica na Primeira Etapa de Ensaio	86
5.2.3 Aspersão Térmica na Segunda Etapa de Ensaio	87
5.2.4 Aspersão Térmica na Terceira Etapa de Ensaio	89
6 RESULTADOS	93

6.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA	93
6.1.1 Peças Formadas	93
6.1.2 Deposição de Alumínio Através de Aspersão Térmica.....	94
6.1.3 Ensaio de Dobramento.....	95
6.2 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA.....	97
6.2.1 Peças Formadas	97
6.2.2 Aspersão Térmica	98
6.2.3 Ensaio de Dobramento.....	99
6.2.4 Ensaio de Densidade	102
6.2.5 Ensaio de Absorção de Água	104
6.2.6 Ensaio de Tração	105
6.2.6.1 Tensão máxima e de ruptura	105
6.2.6.2 Módulo de Young.....	109
6.2.6.3 Deformação	112
6.2.7 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	113
6.2.8 Ensaio de Difratometria de Raios-X	119
6.2.9 Ensaio de Perfilometria	120
6.3 RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA	121
6.3.1 Peças Formadas	121
6.3.2 Aspersão Térmica na Terceira Etapa de Análise	121
6.3.2.1 Aspersão térmica com alumínio.....	121
6.3.2.2 Aspersão térmica com cobre	124
6.3.3 Ensaio de Dobramento.....	126
6.3.4 Ensaio de Densidade	128
6.3.5 Ensaio de Absorção de Água	130
6.3.6 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	131
6.3.7 Ensaio de Difratometria de Raios-X	137
6.3.8 Ensaio de Perfilometria	138
7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	139
7.1 ASPERSÃO TÉRMICA SOBRE AS PEÇAS	139
7.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO	141
7.3 ENSAIO DE DENSIDADE	143

7.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	144
7.5 ENSAIO DE TRAÇÃO	145
7.6 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	147
7.7 ENSAIO DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X	149
7.8 ENSAIO DE PERFILOMETRIA	150
8 CONCLUSÃO	151
9 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	153
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154

1 INTRODUÇÃO

Nesta tese será apresentado, inicialmente, um estudo sobre filamentos de compósitos obtidos por extrusão, e preparados com polipropileno, um compatibilizante polimérico e serragem. Como o objetivo seguinte era fazer revestimentos de Al e Cu através do processo de aspersão térmica à chama nos filamentos, condições ótimas para a preparação dos filamentos foram pesquisadas e o processo de aspersão térmica foi adequado aos substratos poliméricos selecionados. Os filamentos, revestidos ou não com Al e Cu, foram caracterizados. Um novo processo de moldagem que utiliza filamentos viscosos de polímeros oriundos de uma extrusora, equipamento que usualmente produz apenas perfis, foi desenvolvido e peças com geometrias variadas foram produzidas de forma experimental.

O revestimento de filamentos com Al ou Cu visa proporcionar uma resistência mecânica adicional significativa às peças além de lhes conferir uma aparência metálica singular. Dentre as vantagens do uso de filamentos viscosos de compósitos polipropileno/serragem para produzir peças plásticas revestidas com Al ou Cu, destacam-se a resistência à corrosão, leveza, versatilidade para obtenção de formas, usando-se apenas uma extrusora, e o aspecto diferenciado das peças.

1.1 PROBLEMA

Como produzir peças formadas por filamentos de compósitos polipropileno/serragem e revestidas com Al ou Cu, através do processo de aspersão térmica à chama, que apresentem propriedades mecânicas suficientes e revestimento adequado?

1.2 OBJETIVOS

1. Estudar a aplicação de diferentes quantidades de fibra de madeira, de forma a alcançar filamentos com flexibilidade adequada.
2. Avaliar os parâmetros da preparação dos filamentos de compósito polipropileno/serragem que afetam o processo de aspersão térmica à chama, ao experimentar diferentes temperaturas de aquecimento do compósito durante o processo de fabricação dos filamentos e avaliar características como absorção de água, melhor homogeneidade, resistência mecânica conferida ao material e degradação da madeira.
3. Aplicar revestimento de Al ou Cu, através do processo de aspersão térmica à chama, sobre os filamentos e avaliar o resultado obtido em relação ao aumento de resistência mecânica das peças, além da valorização do elemento estético.

1.3 HIPÓTESES

1. A utilização de fibras de madeira na matriz de PP conferirá reforço mecânico ao material e permitirá a obtenção de filamentos com flexibilidade adequada à moldagem dos filamentos para a produção de peças plásticas.
2. A forma como os filamentos de compósito são produzidos, isto é, a utilização de um compatibilizante polimérico, a obtenção de um material homogêneo, o resfriamento do material na presença ou não de água e a temperatura de secagem do compósito afetarão o processo de aspersão térmica à chama durante a deposição de Al ou Cu.
3. Os compósitos preparados na forma de filamentos e revestidos com Al ou Cu apresentarão maior resistência mecânica do que os filamentos não revestidos e também, apresentarão uma aparência metálica esteticamente atraente, o que pode representar um ganho em termos de valorização desses materiais quando moldados no formato de peças para diversas aplicações.

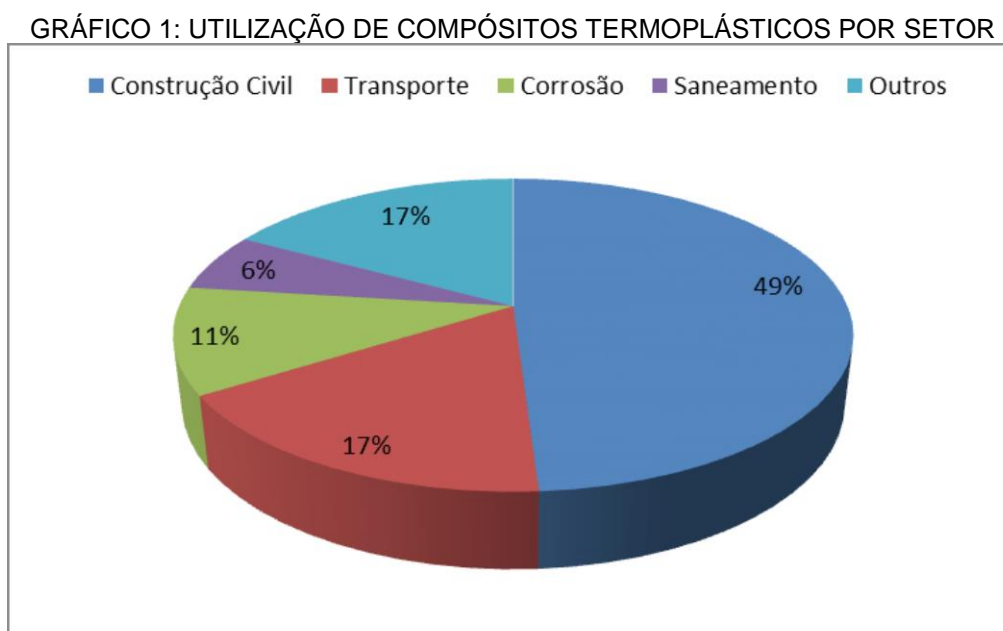
1.4 JUSTIFICATIVA

A utilização de compósito polipropileno/serragem para moldar peças com geometrias relativamente complexas a partir de filamentos viscosos oriundos de uma extrusora, equipamento que é usada somente na produção de perfis, constitui uma novidade e a utilização do processo de aspersão térmica à chama para a obtenção de revestimentos de Al ou Cu nas peças produzidas a partir de filamentos de compósitos polipropileno/serragem, adiciona valor às peças não somente devido à aparência metálica singular do material, mas também, ao aumento de sua resistência mecânica.

Na literatura não há trabalhos que tratem do revestimento de substratos poliméricos com alumínio ou cobre utilizando o processo de aspersão térmica à chama, pois, devido às altas temperaturas de fusão dos metais e das baixas temperaturas de fusão dos polímeros, aparentemente, o processo seria inviável. Como o polipropileno, polímero utilizado nesta pesquisa, possui uma baixa energia superficial, é muito difícil obter revestimentos metálicos em seu substrato através do processo de aspersão térmica à chama. Entretanto, a utilização de serragem nos compósitos de polipropileno altera não somente a energia superficial do substrato, mas também, a rugosidade do material, o que facilita o ancoramento de partículas de Al ou Cu.

Em relação aos compósitos, o setor brasileiro faturou R\$ 850 milhões no primeiro trimestre de 2014, alta de 11,2% em comparação a igual período do ano de 2013 e 0,5% acima do resultado dos últimos três meses de 2013. Em termos de produção, nos três primeiros meses de 2014 foram produzidos 53,7 mil toneladas de compósitos, sendo 8% superior ao igual período de 2013; porém, 1,2% inferior em volume se comparado com os três últimos meses do ano de 2013, em virtude do ajuste econômico que afetou setores como o de transporte, agronegócio e náutico. No ano de 2013 o faturamento foi de R\$ 3,250 bilhões, o que representou uma alta de 9% em comparação ao ano de 2012, crescimento este que foi garantido pelos mercados de energia eólica, agrícola e construção civil (ALMACO, 2014).

Em comparação com o ano de 2008, no qual o setor de compósitos faturou R\$ 2,224 bilhões, houve um acréscimo de 31% no faturamento de 2013. Em 2008, sob o ponto de vista do faturamento, o setor de transportes ficou em primeiro lugar, com 33%, sucedidos pelos setores de energia (23%) e da construção civil (18%), todos com aplicações industriais para produtos que não necessitam de alta resistência mecânica, como janelas e portas, móveis, painéis automotivos, entre outros. No ano de 2013, de diferente modo, a construção civil liderou com uma fatia de 49% do mercado o ranking brasileiro dos principais consumidores de compósitos, seguida pelo setor de transporte com 17%, corrosão, 11%, e saneamento, 6%, conforme apresentado no Gráfico 1 (ALMACO, 2014; ARAÚJO et al., 2010; CHAHARMAHALI et al., 2010; LA MANTIA et al., 2011).



FONTE: ABMACO (2008)

No final da década de 80 o compósito já começou a ser utilizado para fabricação de decks e desde a década de 90 a indústria dos plásticos obteve avanços expressivos em mercado e tecnologia de *Wood-Plastic-Composite* WPC (HILLIG et al., 2008; NING et al., 2007). O desenvolvimento continuado e o uso de compósitos plástico/madeira torna o setor dos WPC um dos mais dinâmicos da indústria de plástico de hoje, com uma taxa média de crescimento anual de aproximadamente 18% na América do Norte e 14% na Europa (ASHORI, 2007; NOURBAKHS, 2010).

A utilização de fibra de madeira, por sua vez, como carga em termoplásticos, já é conhecida desde a década de 70 pela indústria automobilística (CORREA et al., 2003; COUTINHO et al., 2003), ao empregar compósitos de polipropileno com farinha de madeira em diversas aplicações.

No Brasil, aproximadamente 83% da floresta de Pinus plantada estão na região sul do país, devido às condições climáticas e à localização dos principais centros processadores desse tipo de madeira. Nesta região, o Estado do Paraná lidera o *ranking* de área plantada de Pinus, com 40,1% da área total, seguido por Santa Catarina, que possui 32,8% (ABRAF, 2012). De toda esta quantidade, 30 a 60% das árvores, dependendo da empresa, são transformadas em produtos de madeira, no qual a maior percentagem é destinada à utilização na serraria, com 35%, seguida pelo uso no setor energético, com 31,2%. Deste modo, a madeira representa um importante produto de exportação no agronegócio do estado do Paraná, com índice de crescimento anual médio do setor na ordem de 7,7% (ABRAF, 2012).

Já a geração de resíduos no desdobro e beneficiamento da madeira apresenta perdas entre 20 e 40%, entre os quais a serragem é um dos mais abundantes. Desta forma, a utilização de serragem, obtida das árvores de Pinus, contribui com o aproveitamento de um resíduo de fonte renovável para a preparação de compósitos termoplásticos que também podem ser reciclados após o descarte das peças plásticas (ABRAF, 2012; SPINACÉ, 2005).

1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa apresenta a caracterização de filamentos poliméricos de PP reforçados com fibras de madeira para posterior uso como substrato para o revestimento de Al ou Cu através do processo de aspersão térmica à chama. Peças plásticas com formatos diferentes de perfis, revestidas com Al ou Cu são apresentadas, mostrando o potencial da técnica de moldagem por filamentos viscosos oriundos de uma extrusora.

1.6 VISÃO GERAL DO MÉTODO DE PESQUISA

Experimentos, levantamentos, análise de arquivos, pesquisas históricas e estudos de caso são alguns exemplos de estratégia de pesquisa. Cada estratégia apresenta vantagens e desvantagens próprias, dependendo basicamente de três condições: a) o tipo de questão da pesquisa ("quem", "o que", "onde", "como" e "por que"); b) o controle que o pesquisador possui sobre os eventos comportamentais efetivos (abrangência do controle sobre eventos e o acesso a eles); c) o foco em fenômenos históricos, em oposição a fenômenos contemporâneos (HEDRICK et al., 1993; YIN, 2011).

Desta forma, esta tese tem como foco de estudo questões mais explanatórias em situações em que o experimentador não pode manipular o comportamento de forma precisa, mas nas quais a lógica do planejamento experimental ainda pode ser aplicada. Estas situações são comumente denominadas de quase experimentais, o que será a estratégia aplicada nesta pesquisa, em virtude de não ser possível a obtenção de controle sobre todos os eventos comportamentais (HEDRICK et al., 1993; YIN, 2011).

1.7 ESTRUTURA DA TESE

No capítulo 1 desta tese é feita a apresentação do conteúdo e do problema de pesquisa a ser resolvido, com base em objetivos e hipóteses. Também constam, nesta etapa, a justificativa, a delimitação do tema e o método de pesquisa utilizado.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura com ênfase nos seguintes assuntos: compósitos madeira/plástico, polímero polipropileno, compatibilizante, fibras vegetais, a influência da umidade no compósito madeira/ plástico, técnicas para o processamento de termoplástico e aspersão térmica.

O capítulo 3 fará a apresentação da contribuição da pesquisa.

No capítulo 4 inicia-se a pesquisa, ao apresentar a metodologia para o seu desenvolvimento, como os materiais utilizados, as etapas que serão necessárias e

a preparação dos filamentos e amostras para cada uma delas. Também consta neste capítulo a apresentação das técnicas de caracterização dos compósitos por ensaio de tração, microscopia eletrônica de varredura (MEV), densidade relativa, absorção de água, dobramento, difratometria de raios-X e perfilometria.

O capítulo 5 apresenta a fabricação dos corpos de prova de cada etapa da pesquisa e a aplicação de filamentos para a formação de peças com o material ainda viscoso. O processo de aspersão térmica para a deposição de Al ou Cu sobre estes filamentos e peças também é apresentado neste momento.

No capítulo 6 os resultados alcançados são explanados para cada etapa e para cada ensaio, com ênfase para os resultados alcançados de deposição de alumínio e cobre sobre o compósito estudado.

O capítulo 7 traz uma discussão sobre os resultados alcançados.

No capítulo 8 faz-se um cruzamento entre os resultados alcançados e os objetivos da pesquisa, sendo também respondidas as hipóteses anteriormente formuladas.

O capítulo 9 apresenta a sugestão de trabalhos futuros, que poderão dar seguimento ao estudo iniciado nesta tese.

E por fim, o capítulo 10 apresenta as referências bibliográficas utilizadas como embasamento desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPÓSITOS MADEIRA/ PLÁSTICO

Compósito é um material heterogêneo, formado por pelo menos uma fase contínua polimérica (matriz) e outra descontínua (reforço). Estas fases se agregam físico-quimicamente após um processo de crosslinking polimérico (cura para termorrígidos) ou através da compatibilização química (para termoplásticos) (ABMACO, 2008; SHESHMANI et al., 2010; ZABIHZADEH et al., 2009; ZABIHZADEH et al., 2010; ANDRADE et al., 2001; NOURBAKHSI et al., 2010). Para Koenig et al. (2002) compósito polímero/madeira é uma mistura de madeira com resina plástica e pode ou não ser um material mais reforçado em relação à sua matriz polimérica. Ou ainda, para Ashori (2007), compósito WPC refere-se a qualquer composto que contém fibras vegetais (podendo ser madeira ou produtos da agro-indústria), sendo assim produzidos pela adição de fibras de plantas misturadas ao polímero, ou pela adição de fibras de madeira como material de enchimento em uma matriz polimérica, que passarão pela prensagem ou moldagem sob pressão e temperatura elevadas.

A preparação de compósitos de madeira com polímero é uma prática antiga, particularmente quanto à utilização de resinas termofixas como uréia-formaldeído (UF), melamina-formaldeído (MF) ou isocianatos na produção de painéis MDF (*Medium Density Fiberboard*). Mesmo considerando que o principal problema seja a adequada incorporação das fibras na matriz, alguns estudos apontaram que o emprego desse material na matriz polimérica pode melhorar o desempenho do produto acabado (CRAVO et al., 2015; HILLIG et al., 2008; NING et al., 2007).

Porém, embora os compósitos de madeira/plástico sejam utilizados principalmente em aplicações semi-estruturais, por não possuírem resistência à flexão e resistência à tração para vãos longos e aplicações estruturais, possuem vantagens tais como melhor estabilidade dimensional, capacidade de resistir à penetração de umidade, possibilidade de adição de resíduos vegetais,

necessidade de pouca manutenção, em razão de não racharem com facilidade e não empenarem, são facilmente moldados em formas complexas, leves, versáteis e de baixo custo, quando comparados com a madeira na forma natural ou mesmo a outros compósitos (BAJWAA et al., 2011; FARUK et al., 2008; FARUK et al., 2012; LEU, 2011; NOURBAKHS et al., 2010; TAMRAKAR et al., 2011).

Tradicionalmente, a indústria de plástico utiliza talco, carbonato de cálcio, mica, fibra de vidro ou de carbono para modificar o desempenho dos plásticos (ECKERT, 2000). As fibras de vidro, em especial, são amplamente utilizadas como reforço devido ao seu baixo custo (em comparação com aramida e carbono) e possuem boas propriedades mecânicas. Porém, fibras naturais possuem algumas vantagens quando comparadas com as fibras de vidro, assim como pode ser verificado na Tabela 1 (CORREA et al., 2003; FINKLER et al., 2005; WAMBUA, 2003).

TABELA 1: COMPARAÇÃO ENTRE FIBRAS NATURAIS E FIBRAS SINTÉTICAS

	Fibras Naturais (FN)	Fibras de Vidro (FV)
Densidade	Baixo	Duas vezes a da FN
Custo	Baixo	Baixo, porém, maior que da FN
Renovável	Sim	Não
Reciclável	Sim	Não
Consumo de energia	Baixo	Alto
Distribuição	Grande	Grande
Liberação de CO ₂	Não	Sim
Abrasivo	Não	Sim
Riscos para a saúde	Não	Sim
Descarte	Biodegradável	Não Biodegradável

FONTE: WAMBUA (2003)

Conquanto, quando se pensa em utilizar compósitos madeira/plástico faz-se necessário cautela com a baixa temperatura de degradação da celulose, que ocorre na faixa de 200 a 220°C. Temperaturas de processamento inferiores a 190°C são recomendadas para uma melhor qualidade do compósito, evitando a degradação da fibra, o que ocasiona propriedades organolépticas insatisfatórias, tais como odor e alteração nas cores, além da produção de produtos gasosos durante o processamento, que ocasionará alta porosidade, baixa densidade e redução das propriedades mecânica do material. Todavia, a temperatura de

processamento não deve ser inferior a 160°C, de forma a garantir adequada fusão da matriz (JOHN et al., 2006; KU et al., 2011; SCHUT, 1999). Esta limitação, em relação à utilização das fibras naturais, define os tipos de termoplásticos que podem ser utilizados como matrizes poliméricas nos compósitos madeira/plástico, como é o caso do poli(cloreto de vinila) (PVC), do polietileno (PE), do polipropileno (PP) e do poliestireno (PS) (JOHN et al., 2006; KU et al., 2011; SCHUT, 1999).

A percentagem de fibras no compósito também tem relação direta com o desempenho do mesmo em termos morfológicos, térmicos e mecânicos. Ku et al. (2011) recomendam o uso de até 20% p/p de fibras de madeira, sendo isto atribuído ao fato do aumento da percentagem de fibras naturais em matriz de polipropileno causar uma redução na resistência à tração do PP, visto que as fibras são polares e o PP é apolar, o que representa uma incompatibilidade. No entanto, quando há o desenvolvimento de uma boa adesão fibra/matriz, compósitos com até 35% p/p de fibras de madeira podem apresentar melhora no desempenho da matriz (ASHORI et al., 2009; SANTOS et al., 2015b).

Por conseguinte, o acréscimo da fibra em um compósito aliado ao uso de um compatibilizante, no caso, o polipropileno maleatado (PPMA) que é utilizado nesta pesquisa, resulta em melhor adesão interfacial entre a matriz e as fibras e também em uma distribuição mais uniforme das fibras na matriz, o que permite acréscimo de resistência à flexão, redução na absorção de água e aumento da vida útil do compósito (ASHORI et al., 2009; CORREA et al., 2003; FINKLER et al., 2005; WAMBUA, 2003).

2.2 POLÍMERO POLIPROPILENO

Polipropileno isotático (PP) representa 25% dos polímeros comerciais produzidos no mundo devido à sua alta cristalinidade a qual confere elevada resistência à tração, rigidez e dureza, além de excelente processabilidade, reciclabilidade, leveza, boa resistência à umidade e baixo custo. O polipropileno também tem destaque em propriedades elétricas e químicas, típica de polímeros de hidrocarbonetos (LEE, 1998; ZHANG et al., 2013).

Em contrapartida, polipropileno não é estável quando exposto a baixas temperaturas, ao calor, à luz, e ao ataque oxidativo, devendo ser estabilizado com antioxidantes e absorventes de luz ultravioleta para o processamento satisfatório e atendimento das condições atmosféricas. Outro ponto restritivo é a sua baixa receptividade a substâncias adesivas pelo fato de apresentar uma baixa energia superficial, a qual pode ser associada à baixa polaridade e pouca disponibilidade de moléculas para a realização de ligações químicas (SILVA et al., 2007; BALART et al., 2012).

Ademais, possui baixa densidade (em torno de 0,90 – 0,91 g/cm³), ponto de amolecimento em torno de 120°C e baixo ponto de fusão (165 – 175°C) (AKCELRUD, 2007; BILLMEYER, 1971; LEE, 1998; ZHANG et al., 2013). A Figura 1 mostra a estrutura química do polipropileno:

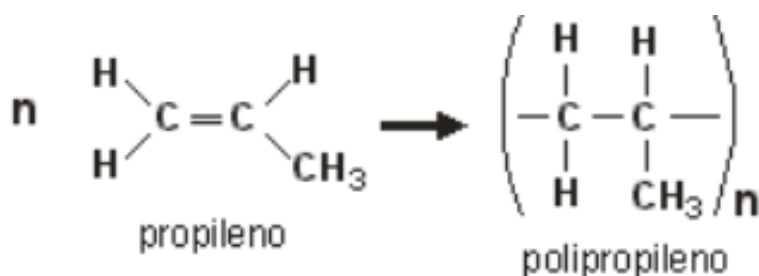


FIGURA 1: ESTRUTURA QUÍMICA DO POLIPROPILENO
FONTE: BILLMEYER (1971)

surgimento de grandes espaços vazios e cavidades em torno das fibras. Esse fenômeno pode também ser atribuído ao tamanho, relativamente grande, da partícula de madeira.

Entretanto, a adição de 3 a 5% em peso de compatibilizante em uma mistura madeira/plástico já é suficiente para promover uma grande melhora na adesão do compósito, ao ser iniciada uma reação de esterificação com o grupo hidroxila da farinha de madeira (ADHIKARY et al., 2008; ASHORI et al., 2009). Em contrapartida, a utilização em excesso de agente de compatibilização pode ocasionar a diminuição do desempenho mecânico dos compósitos (CUI, 2007; LU et al., 2002; SCHUT, 1999).

Entre os diferentes reagentes empregados na modificação de polipropileno para compor compósitos madeira/plástico, o anidrido maleico é o mais comumente utilizado. O anidrido maleico é utilizado para modificar o polipropileno, ou seja, forma o polipropileno maleatado através de uma reação de enxerto de radical livre (grafitização) de anidrido maleico no homopolímero de PP isotático na presença de um iniciador peróxido orgânico (CONZATTI, 2013; ISMAIL et al., 2010; KOSAKA et al., 2007; KU et al., 2011; MARKARIAN, 2002; MORESCO, 2009; RANADE et al., 2005; WAMBUA, 2003; WECHSLERA et al., 2006; YEH et al., 2008; ZAMPALONI et al., 2007; ZHANG et al., 2013). Esses compatibilizantes são geralmente preparados em uma extrusora ou em um misturador interno, sem ou com uma pequena quantidade de solvente e, geralmente, na presença de um peróxido orgânico (NALDONY et al., 2015; SANTOS et al., 2015a; QIU et al., 2005; TROMBETTA et al., 2015). A fórmula do anidrido maleico e a funcionalização do PP com anidrido maleico são ilustradas no esquema da figura 2.

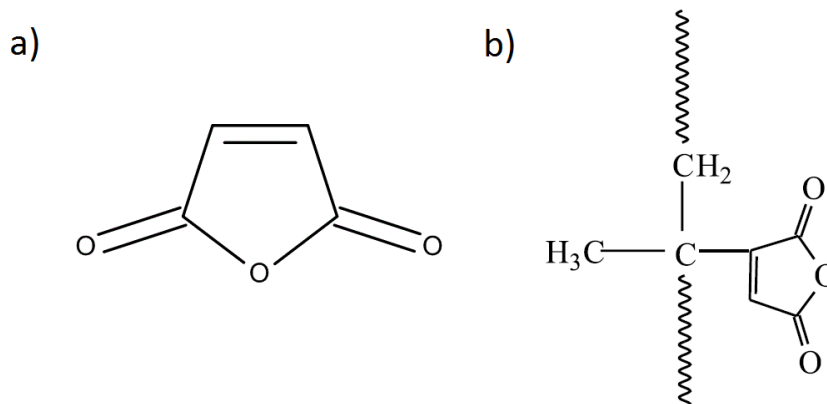


FIGURA 2: a) ESTRUTURA QUÍMICA DO ANIDRIDO MALEÍCO. b) FUNCIONALIZAÇÃO DO PP COM ANIDRIDO MALEICO

FONTE: ADAPTADO DE BARBOZA (2002)

Os grupos funcionais do anidrido maleico, presentes no polímero modificado, são aptos a interagir fortemente com os grupos hidroxilas presentes na superfície dos materiais lignocelulósicos, enquanto a longa cadeia provinda do PP se difunde na matriz polimérica apolar, melhorando a adesão da interface carga/matriz e formando entrelaçamentos entre as longas moléculas, constituindo materiais de maior valor agregado, com melhores propriedades mecânicas, térmicas e químicas, o que contribui para ressaltar as vantagens dos compósitos em relação à madeira, ou seja, baixa ou nenhuma manutenção, ausência de rachaduras e empenamentos (DÁNYÁDI et al., 2010; MORESCO, 2009; NALDONY et al., 2015; SANTOS et al., 2015a; SANTOS et al., 2015b).

Destarte, a adesão interfacial melhorada fornece hidrofobicidade para as fibras por causa da esterificação dos grupos anidrido de PPMA com os grupos hidroxila das fibras naturais, ocasionando a redução do número de grupos hidroxila livres da celulose, que são responsáveis pela absorção de água (BECKER et al., 2011; DÁNYÁDI et al., 2010; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ et al., 2008; SUDHAKARA et al., 2013; YANG et al., 2006; YANG et al., 2007). A Figura 3 mostra como um compatibilizante, que pode inclusive ser uma poliolefina maleatada, atua no aumento da adesão fibra/matriz.

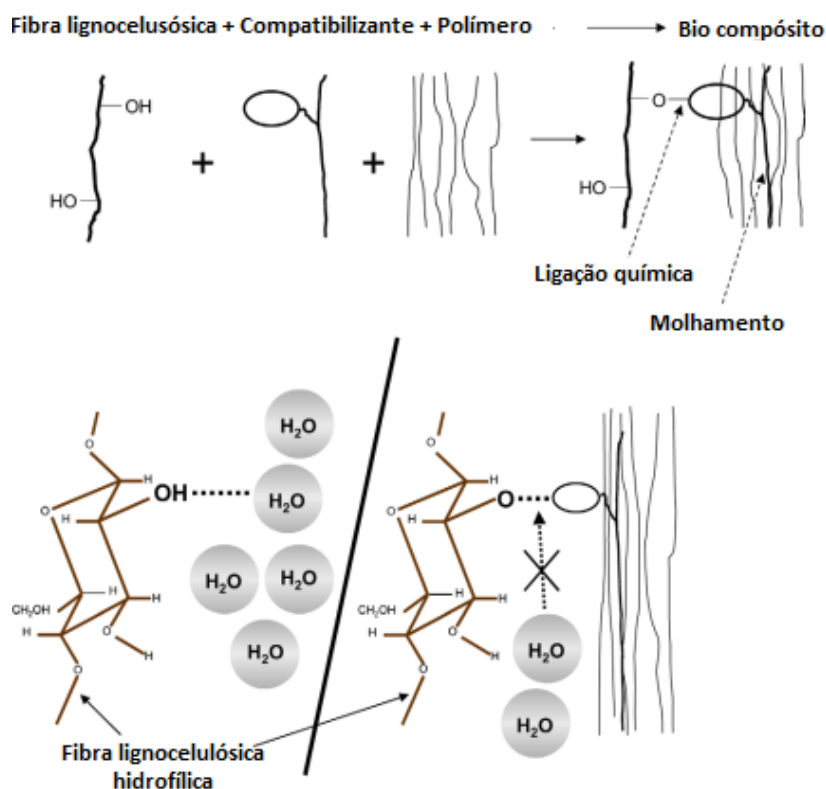


FIGURA 3: ATUAÇÃO DO COMPATIBILIZANTE NO SISTEMA FIBRA/MATRIZ
FONTE: YANG (2006)

Em relação à taxa de absorção de água, esta depende também, além da quantidade de compatibilizante, da velocidade do parafuso e do tempo de residência do material na extrusora, e do teor de anidrido maleico incorporado à poliolefina através da graftização (DENG et al., 2010; MACHADO et al., 2011; YEH et al., 2008).

A Figura 4 (a) e (b) mostram superfícies de fratura de amostras de compósitos, visualizadas através de um microscópio eletrônico de varredura, e o efeito da adição de polietileno maleatado (PEMA) em um compósito madeira/plástico (SHESHMANI et al., 2010). Os compósitos feitos com PPMA ou PEMA possuem maior densidade e menor porosidade e, assim, têm uma melhor dispersão e uma melhor força interfacial, apresentando tensão de escoamento e alongamento com valores superiores em comparação com os compósitos sem o compatibilizante (ADHIKARY et al., 2007; ASHORI et al., 2009; ESPERT et al., 2004; NAKATANI et al., 2009; SALMAH et al., 2010; SHESHMANI et al., 2010; ZHAO et al., 2009; NALDONY et al., 2015; GAO et al., 2012).

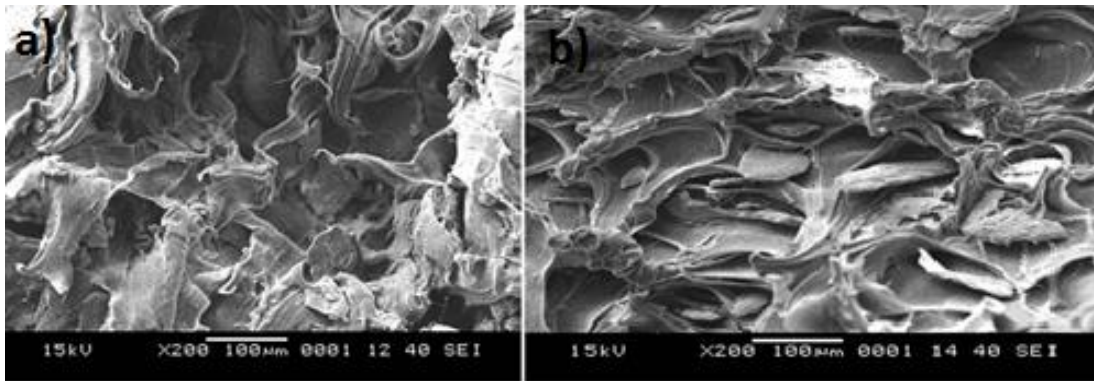


FIGURA 4: a) COMPÓSITO SEM ADIÇÃO DE COMPATIBILIZANTE PEMA. b) COMPÓSITO COM ADIÇÃO DE COMPATIBILIZANTE PEMA
FONTE: SHESHMANI et al. (2010)

Na figura 5a é mostrada a superfície de fratura de um corpo de prova de compósito PP/serragem que apresenta boa adesão fibra/matriz. Entretanto, na Figura 5b, o oposto é observado, com o material compósito preparado sem compatibilizante, sendo possível observar que as fibras estão soltas na matriz, em virtude de uma fraca adesão (DÁNYÁDI et al., 2010).

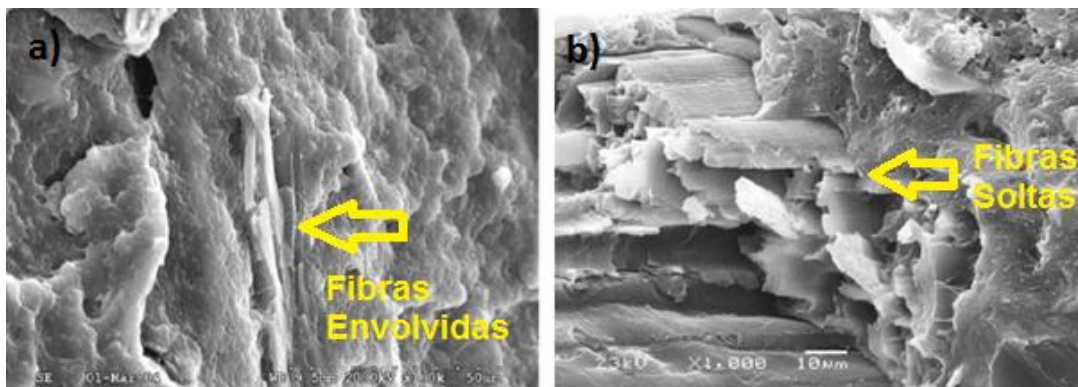


FIGURA 5: a) COMPÓSITO COM ADIÇÃO DE COMPATIBILIZANTE PPMA. b) COMPÓSITO SEM ADIÇÃO DE COMPATIBILIZANTE PPMA
FONTE: DÁNYÁDI et al. (2010)

Além dos aspectos químicos ligados à compatibilização da fibra com a matriz, o desempenho do compósito ainda depende de uma boa dispersão das fibras na matriz e das características do reforço, ou seja, distribuição granulométrica, tamanho e distribuição de tamanho de partículas, área superficial, natureza química da superfície e fração volumétrica máxima de empacotamento da carga (BOUAFIF et al., 2009; CORREA et al., 2003). Tal como no caso de todos os produtos de origem vegetal, a resistência mecânica e as propriedades físicas das fibras variam consideravelmente. Estas propriedades são determinadas

pela composição química e estrutural, que dependem do tipo de fibras e de suas circunstâncias de crescimento. A morfologia das fibras mostra-se variável para cada planta, em virtude das condições climáticas durante o seu crescimento, da idade da planta e de outros fatores que podem influenciar o desempenho das fibras vegetais (ASHORI, 2007; FABIYI et al., 2011).

2.4 FIBRAS VEGETAIS

As fibras vegetais foram introduzidas na preparação de compósitos poliméricos com o objetivo de preparar materiais mais leves e de menor custo, em comparação com fibras inorgânicas, como as de vidro. As fibras naturais têm uma densidade mais baixa ($1,2 - 1,6 \text{ g/cm}^3$) do que a de vidro ($2,4 \text{ g/cm}^3$). As poliolefinas à base de petróleo, tais como polipropileno e polietileno, são usadas extensivamente com estas fibras (AKIL et al., 2011; JOHN et al., 2006).

As fibras podem ser classificadas em dois grupos principais: sintéticas e naturais, sendo que as naturais são subdivididas de acordo com a sua origem, ou seja, se elas são derivadas de vegetais, animais ou minerais, conforme mostra a Figura 6. As fibras animais são as compostas de proteínas, enquanto as minerais incluem o amianto, a brucita e a Wollastonita. As fibras vegetais, por sua vez, são compostas por fibras celulósicas, ou lignocelulósicas (AKIL, 2011).

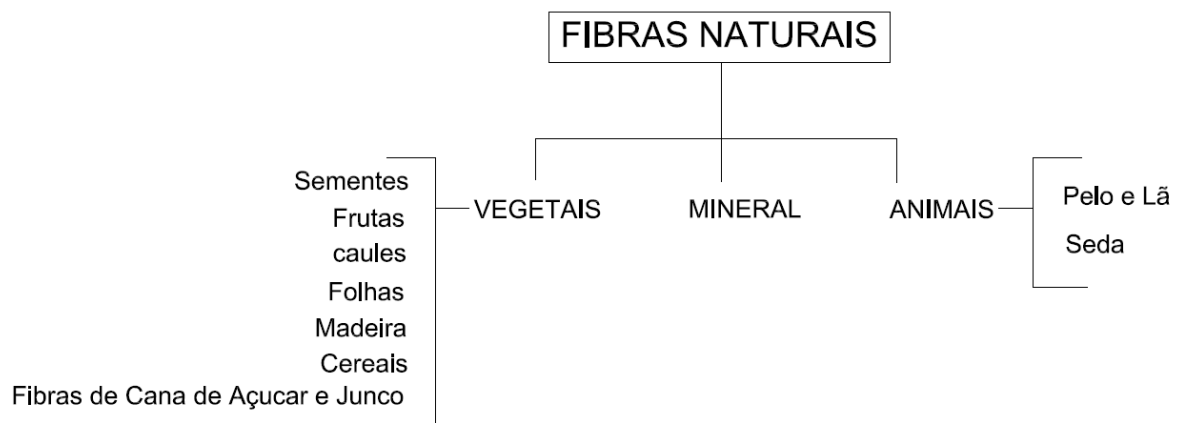


FIGURA 6: CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS NATURAIS
FONTE: AKIL (2011)

A madeira é um material lignocelulósico composto por três componentes principais, celulose (42 – 44%), hemicelulose (27 – 28%) e lignina (24 – 28%), com a presença de alguns constituintes menores (extrativos: 3 – 4%). A porção principal da madeira é a celulose, material cristalino que confere alta rigidez em compósitos termoplásticos (AKIL et al., 2011; ADHIKARY et al., 2007). A celulose (Figura 7) é um homopolímero natural (polissacarídeo), onde os anéis D-glucopiranosose são ligados uns aos outros através de ligações glicosídicas (AKIL, 2011).

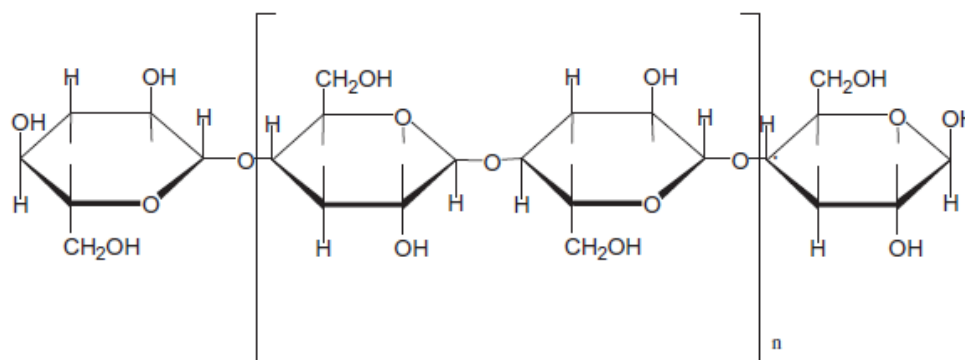


FIGURA 7: ESTRUTURA QUÍMICA DA CELULOSE
FONTE: AKIL (2011)

Um atributo importante das fibras vegetais é a sua capacidade de absorver a umidade da atmosfera em grandes quantidades, em virtude da higroscopicidade da celulose, ocasionando alterações no peso e nas dimensões, bem como na rigidez. Além disso, a fibra vegetal é exposta a deterioração biológica, suscitando o escurecimento e o enfraquecimento das fibras com a idade e com a exposição à luz (AKIL, 2011; NAKATANI et al., 2009).

Em contrapartida, as fibras naturais não são abrasivas para equipamento de mistura e de moldagem, o que pode contribuir para uma significativa redução de custos e de manutenção de equipamentos; além de apresentarem segura manipulação e boas condições de trabalho, em comparação com os reforços sintéticos, tais como fibras de vidro, em virtude de seu tratamento ser de pouco impacto para o meio ambiente (AKIL, 2011; NAKATANI et al., 2009; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ et al., 2008).

2.5 A INFLUÊNCIA DA UMIDADE NO COMPÓSITO MADEIRA/PLÁSTICO

Outro aspecto a ser avaliado sobre a quantidade de fibras utilizadas no compósito é a sua sensibilidade à água, sendo esse um critério importante para a aplicação de produtos compósitos plástico/madeira. As partículas de madeira são polares (hidrofílicas), devido à presença de lumens, poros finos e sítios de ligação de hidrogênio. Desta forma, acredita-se que a umidade nos compósitos plástico/madeira é absorvida pelas fibras lignocelulósicas existentes no mesmo, sendo que o aumento na quantidade de fibras pode ocasionar maior absorção de água. Entretanto, a absorção de água em um compósito reforçado por fibras vegetais também é dependente do tamanho e orientação das fibras, da temperatura, da permeabilidade das fibras e da proteção da superfície (ESPERT et al., 2004; YEH et al., 2008; AKIL et al., 2011; ASHORI et al., 2009; ADHIKARY et al., 2008; AFRIFAH et al., 2009; KIM, 2008; WAMBUA et al., 2003; LEU et al., 2011; BAJWAA et al., 2011).

A exposição à água faz com que as partículas de madeira existentes no compósito inchem, originando microfissuras na matriz e degradando a interface do polímero/madeira, o que resulta na redução da densidade da composição. Esta ação origina espaços vazios na interface da matriz com a madeira, pois as partículas ficam soltas no compósito, resultando em um produto poroso, além de ocasionar deterioração das propriedades mecânicas e da estabilidade dimensional (ADHIKARY, 2007; AKIL, 2011; AFRIFAH et al., 2009; ASHORI et al., 2009; DÁNYÁDI et al., 2010; YANG, 2006; ARAÚJO et al., 2010; CHAHARMAHALI et al., 2010; HILLIG et al., 2009; SHESHMANI et al., 2010). Em relação às propriedades mecânicas, a tensão na carga máxima tem seus valores ligeiramente reduzidos após a absorção de água pelo compósito. Este efeito é particularmente evidente para compósitos com maior teor de fibra, em que a carga máxima fica drasticamente reduzida (ESPERT et al., 2004).

Fotografias de MEV podem mostrar claramente a presença de fibras soltas em virtude da absorção de água em um compósito. A Figura 8 apresenta a estrutura de um compósito, polipropileno reforçado por fibras de madeira, antes

(8a) e depois (8b) da absorção de água, em que a perda da adesão entre fibra e matriz, caracterizada pelo surgimento de espaços vazios, pode ser notada (ESPERT et al., 2004).

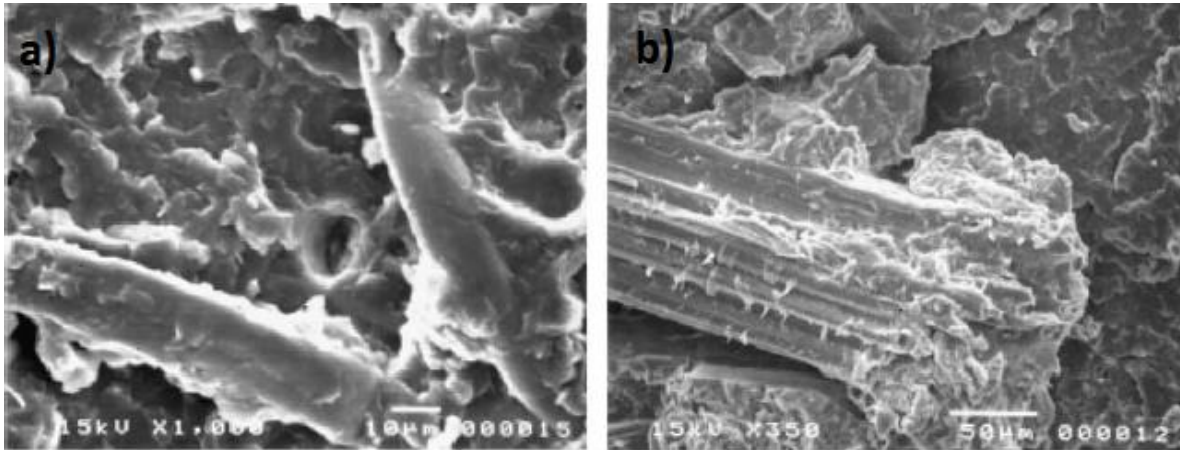


FIGURA 8: a) IMAGEM DE MEV DE COMPÓSITO ANTES DA ABSORÇÃO DE ÁGUA. b) IMAGEM DE MEV DE COMPÓSITO APÓS A ABSORÇÃO DE ÁGUA

FONTE: ESPERT et al.(2004)

2.6 PROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICO

Os processos de conformação de polímeros são análogos aos processos de conformação dos metais. Os principais processos são: extrusão, injeção, sopro, rotomoldagem e termoformação. Em quase todos estes processos o plástico granulado ou em pó é forçado, em temperatura e pressão elevadas, a escoar para o interior do molde e assumir a sua forma. Os termoplásticos, quando aquecidos, tornam-se viscosos e comportam-se como líquidos quando submetidos à pressão dentro de uma matriz (CAUCHICK et al., 2011).

2.6.1 Extrusão

O processo de extrusão consiste na moldagem de um termoplástico viscoso, sob pressão, através de uma matriz. O equipamento utilizado é uma extrusora, na qual polímeros, em forma de grânulos ou pós, são aquecidos por bobinas elétricas e impulsionados por uma rosca transportadora, ou um parafuso sem fim, através de uma câmara, onde ele é compactado, fundido e conformado como uma carga contínua de um fluido viscoso a preencher a matriz (ANDRADE

et al., 2001; CAUCHICK et al., 2011). Uma das vantagens do uso de processo de extrusão é a capacidade de conceber e otimizar o perfil ao mesmo tempo (SOURY et al., 2009; YEH et al., 2008). O esquema do processo de extrusão pode ser visualizado na Figura 9.

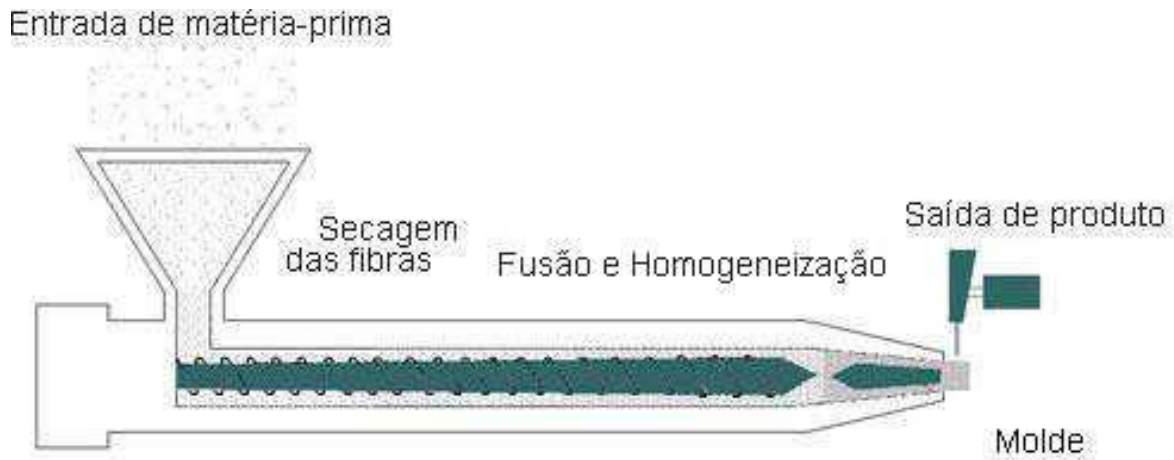


FIGURA 9: ESQUEMA DO PROCESSO DE EXTRUSÃO

O ciclo do processo de extrusão é composto basicamente por cinco fases distintas (DARDENE, 2003):

1. Entrada da matéria-prima;
2. Secagem das fibras de madeira;
3. Fusão do polímero;
4. Homogeneização da mistura de fibras de madeira e polímero;
5. Bombeamento da mistura através do cabeçote (saída).

2.6.2 Injeção

Injeção é a técnica mais utilizada para a fabricação de materiais termoplásticos, podendo produzir peças sólidas ou ocas com geometrias complexas, como parachoques, brinquedos, baldes, tampas, entre outras (CAUCHICK et al., 2011).

O equipamento utilizado é uma injetora e o processo consiste em aquecer eletricamente a matéria-prima e, em seguida, impulsioná-la para dentro de um molde, onde fica sob pressão até que se solidifique (ANDRADE et al., 2001; CAUCHICK et al., 2011; LEE, 1998; RIBEIRO et al., 2013). Um desenho esquemático do processo pode ser visualizado na Figura 10.

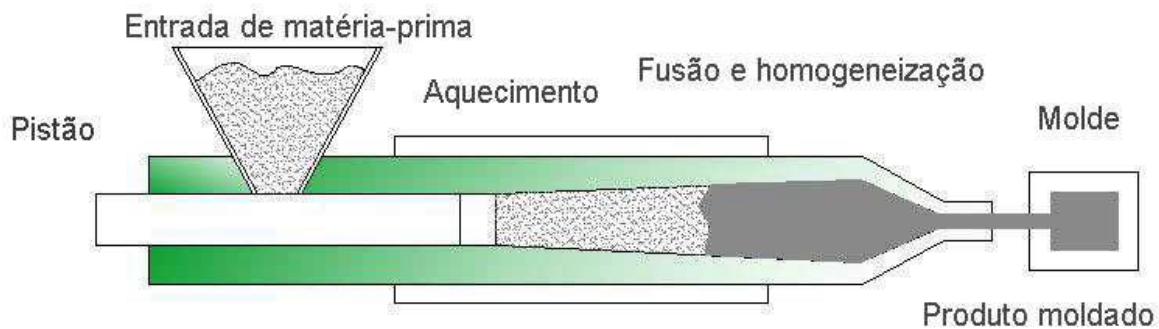


FIGURA 10: ESQUEMA PROCESSO DE INJEÇÃO

O processo de injeção apresenta um ciclo com 5 fases (CANTO, 2004; HARTE et al., 2007; KUO et al., 2009):

1. Entrada do produto em forma de grãos;
2. Aquecimento;
3. Fusão e homogeneização do produto;
4. Injeção (saída) em moldes apropriados;
5. Resfriamento da peça (50% do ciclo de injeção).

2.6.3 Termoformação

A termoformação consiste na moldagem de peças por conformação de chapas ou filmes. Estas chapas são temporariamente amolecidas por ação de aquecimento, sendo logo após forçadas a envolver a superfície de um molde com a forma da peça requerida. Este tipo de processo é muito utilizado para a moldagem de embalagens, linha automobilística, linha branca, copos, banheiras, entre outros. As peças são resfriadas após a finalização da moldagem

(CAUCHICK et al., 2011; LEE, 1998). O esquema do processo pode ser visualizado na Figura 11.

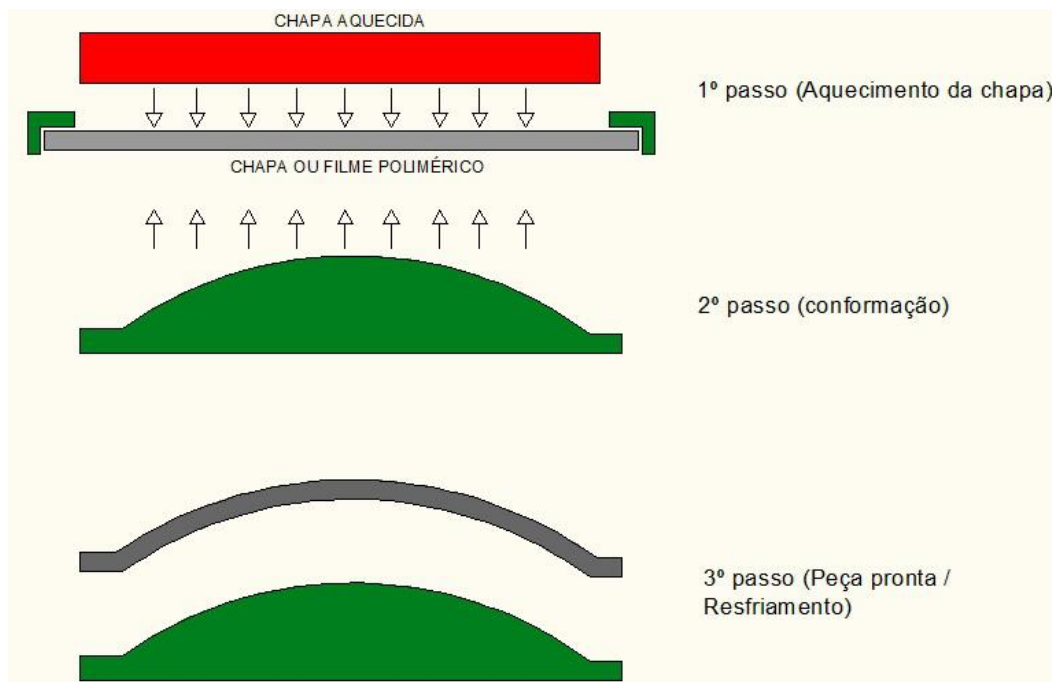


FIGURA 11: ESQUEMA PROCESSO DE TERMOFORMAÇÃO

2.6.4 Rotomoldagem

No processo de rotomoldagem o material termoplástico é inserido na cavidade do molde em forma de pó micronizado ou de uma suspensão de PVC, em quantidade adequada para atender os requisitos de espessura do produto. Em seguida o molde é fechado, colocado em um forno e girado vertical e horizontalmente. O molde, que permanece girando, distribui o material, em início de fusão, sobre suas paredes por efeito da força centrífuga, formando, desta forma, uma película. Após um determinado período o molde é retirado do forno e resfriado, ainda sob rotação, para manutenção da forma desejada da peça, sendo, posteriormente, o produto retirado do molde. O esquema de rotomoldagem pode ser visualizado na Figura 12 (COMISSO et al., 2013; LEE, 1998).

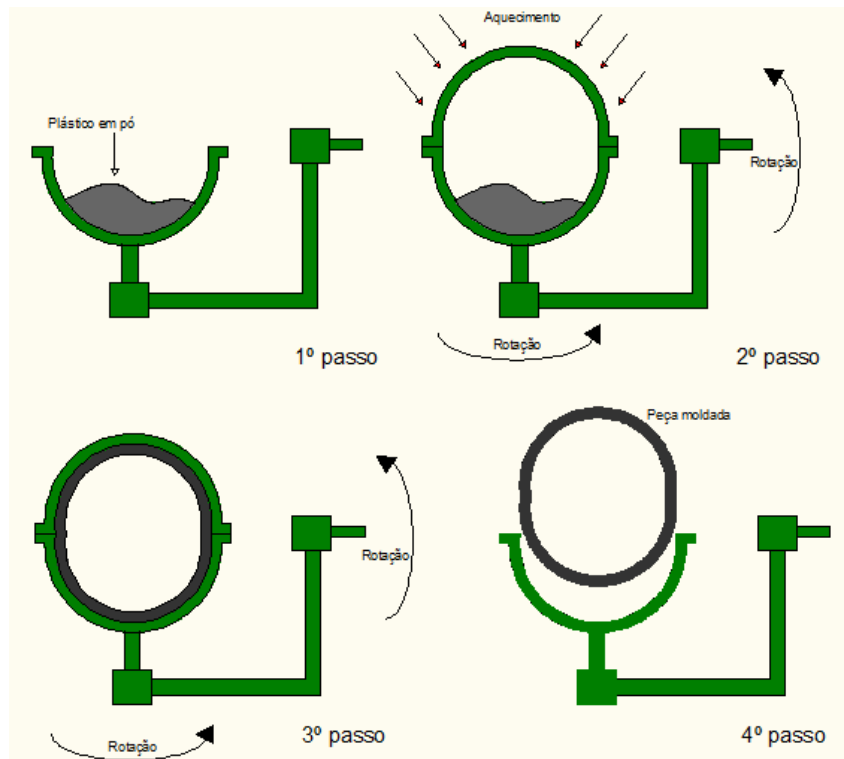


FIGURA 12: ESQUEMA PROCESSO DE TERMOFORMAÇÃO

2.6.5 APLICAÇÃO NESTA TESE

Nesta pesquisa, uma das novidades é a confecção de peças plásticas tridimensionais, produzidas com a utilização de uma extrusora de plásticos, equipamento normalmente usado para a produção de perfis. As peças produzidas com formatos que podem ou não ser perfis, serão confeccionadas a partir de filamentos viscosos oriundos de uma extrusora, podendo ou não ser utilizado um molde de baixo custo durante a confecção da peça. Devido à característica do processo, ou seja, como os filamentos viscosos são dispostos na formação da peça com o auxílio das mãos, as peças são sempre únicas, e, mesmo que seja utilizado um molde, os filamentos não ficam dispostos de forma exatamente igual à da peça anterior, o que representa uma oportunidade que pode ser aproveitada para o design de peças diferenciadas.

2.7 ASPERSÃO TÉRMICA

2.7.1 Propriedades

O processo de aspersão térmica é normalmente utilizado em substratos metálicos, embora recentemente alguns substratos poliméricos estejam sendo usados (policarbonato – PC, copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno - ABS, poliamida-6, polipropileno e poliestireno) para a obtenção de peças leves com revestimentos metálicos ou cerâmicos. A utilização de substratos poliméricos representa um desafio devido às altas temperaturas envolvidas no processo e à baixa energia superficial de alguns polímeros, que dificultam a sua aderência (LUPOI et al., 2010).

Através da aspersão térmica (AT) são depositados revestimentos por vários processos, nos quais o material na forma de arame ou pó é fundido e pulverizado pelo uso de um gás que o transfere, a elevada velocidade, sobre um substrato, formando um revestimento com microestrutura característica. Os processos podem utilizar como fonte de calor a combustão de gases, arco elétrico ou plasma. A otimização das propriedades de aderência de um revestimento sobre um substrato para uma determinada especificação, necessita de um controle cuidadoso dos parâmetros operacionais e de deposição (DHIMAN et al., 2007; EL-HADJA et al., 2010; KOUT et al., 2009; PIERLOT et al., 2008).

Os revestimentos obtidos são avaliados através de sua microestrutura e de sua aderência ao substrato. A microestrutura é determinada por parâmetros tais como porosidade, presença de óxidos, fases cristalinas e propriedades mecânicas, caracterizada principalmente por sua resistência à tração (aderência e coesão), taxas de desgaste resultantes da erosão, abrasão ou deslizamento e resistência a diferentes meios corrosivos (BRADAI et al., 2008; KOUT et al., 2009; PAREDES et al., 2005; SINGH, 2012).

Especificamente, a formação de um revestimento ocorre pela fusão do arame ou pó, com formação de gotículas, e do transporte destas gotículas até o substrato, formando panquecas (*splats*) irregulares. A utilização de

preaquecimento do substrato metálico aumenta a eficiência da deposição e a sua aderência, ao formar panquecas regulares em forma de discos (WILDEN et al., 2006).

As partículas fundidas ou semifundidas impactam com alta velocidade no substrato, deformando-o e formando uma fina camada de revestimento. A microestrutura resultante depende do gradiente de temperatura e da taxa de resfriamento. Em algumas deposições é possível que ocorram tensões residuais no interior do revestimento, as quais são influenciadas por efeitos termo-mecânicos durante o impacto no substrato (PAREDES, 1998). A Figura 13a apresenta uma gotícula de Al com muitos espirros (panqueca irregular), assim como a primeira imagem da Figura 13b. Contudo, a segunda imagem da figura 13b apresenta uma panqueca em forma de disco, caracterizando uma deposição eficiente em um substrato metálico (WILDEN et al., 2006).

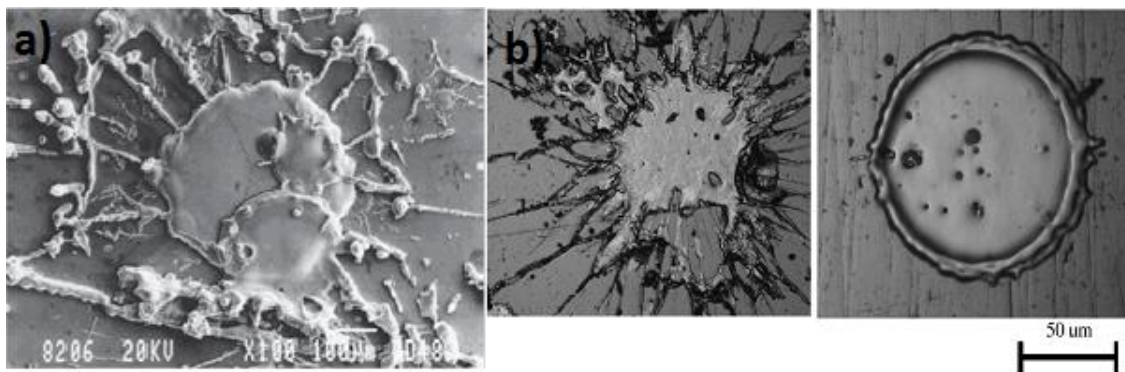


FIGURA 13: a) PANQUECA DEPOSITADA SOBRE SUBSTRATO À TEMPERATURA AMBIENTE.
b) PANQUECAS DE ALUMÍNIO DEPOSITADAS SOBRE SUBSTRATO COM PRAQUECIMENTO
PELO PROCESSO DE AT POR ARCO ELÉTRICO
FONTE: WILDEN et al. (2006)

A Figura 14 mostra um revestimento em corte transversal, na qual se pode observar as panquecas (forma lamelar), poros e os vazios, assim como o substrato metálico.

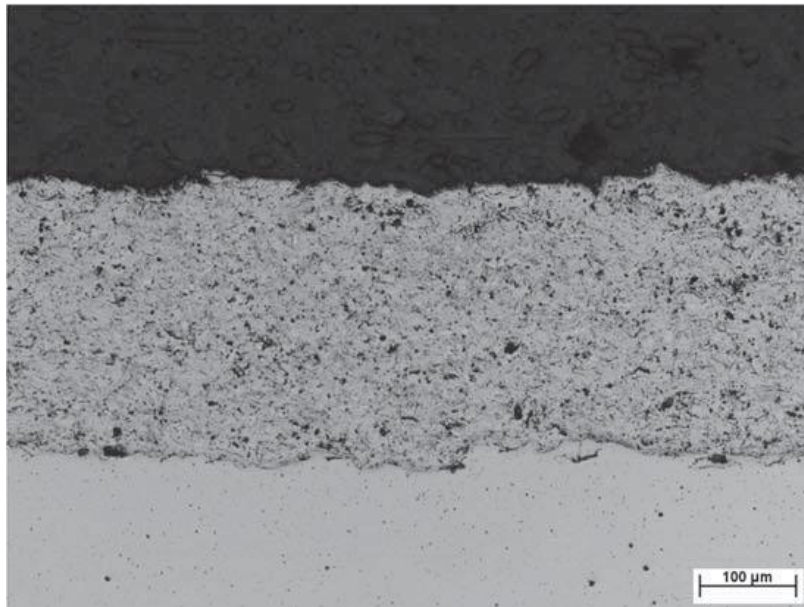


FIGURA 14: MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO DEPOSITADO PELO PROCESSO DE ARCO ELÉTRICO
FONTE: WILDEN et al. (2006)

Durante a aspersão térmica também é possível ocorrer a oxidação durante o voo de gotículas metálicas, principalmente quando é utilizado ar comprimido para transferí-las, o que afeta a porosidade e a rugosidade do revestimento. A porosidade é definida como a quantidade relativa de poros no revestimento e a rugosidade média se refere ao número de saliências na superfície (ALAMARA et al., 2011a; ALAMARA et al., 2011b; KOUT et al., 2009; LUPOI et al., 2010; PAREDES et al., 2005; SINGH, 2012).

2.7.2 Processos

A técnica de aspersão térmica é constituída por um conjunto de diferentes processos utilizados para depositar, numa superfície preparada anteriormente, as camadas de materiais metálicos ou não metálicos (cerâmica, metal, polímero ou compósito) em quase qualquer material de substrato. A classificação dos processos de aspersão térmica distingue-se entre os que usam a chama e os que utilizam a energia elétrica como fonte de energia. Entre os processos que utilizam a energia elétrica estão inseridos o plasma e o arco elétrico e no processo à

chama encontram-se o HVOF e a aspersão por chama (Figura 15) (PAREDES et al., 2005; PAREDES et al., 2007; RODRIGUEZ, 2003).

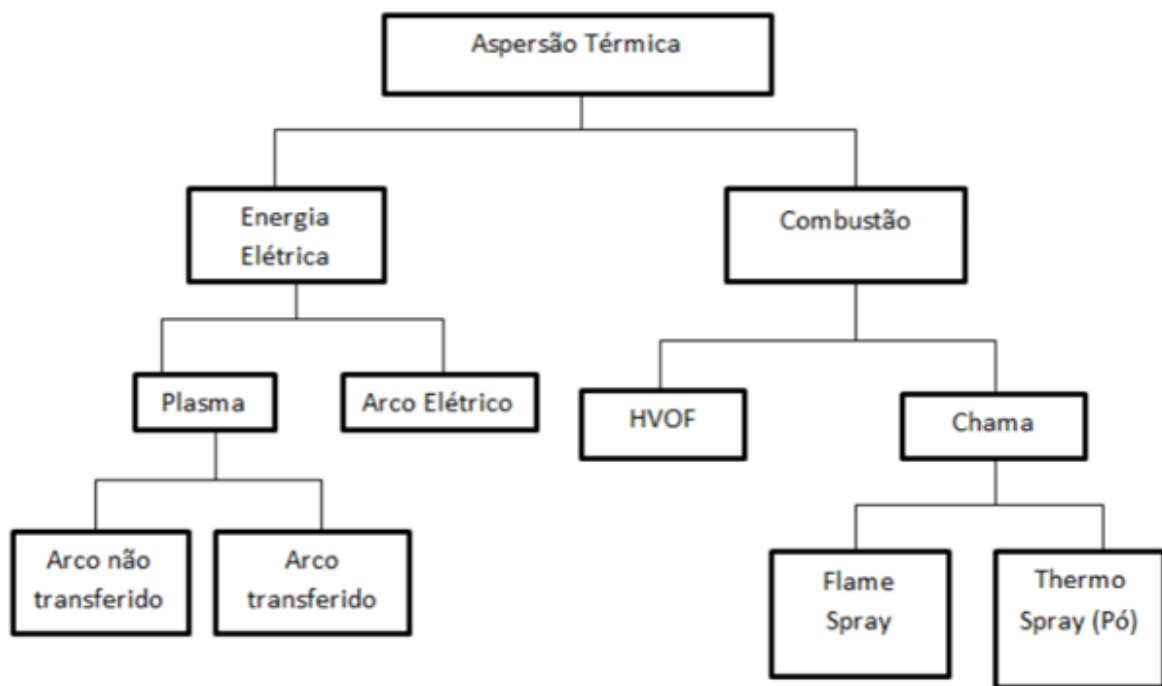


FIGURA 15: CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA
FONTE: PAREDES (2009)

Os processos de aspersão térmica, de forma geral, podem ser descritos por 5 passos (WILDEN et al., 2006):

- 1) Entrada de energia;
- 2) Aquecimento e aceleração;
- 3) Deformação sobre o substrato;
- 4) Nucleação e solidificação;
- 5) Formação do revestimento.

2.7.2.1 Plasma

Produzido por aspersão térmica através de gases ionizados, no qual o pó de revestimento é acelerado em direção à superfície a ser recoberta. Com a alimentação de energia, tem-se inicialmente a dissociação da molécula para átomos independentes. Continuando a alimentação de energia, tem-se uma elevação do nível energético proporcional ao aumento da temperatura até chegar-se ao nível onde a energia alimentada causa a ionização do átomo. Neste processo utilizam-se materiais consumíveis exclusivamente sob a forma de pó. Na Figura 16 mostra-se o esquema do Processo (PAREDES, 2009).

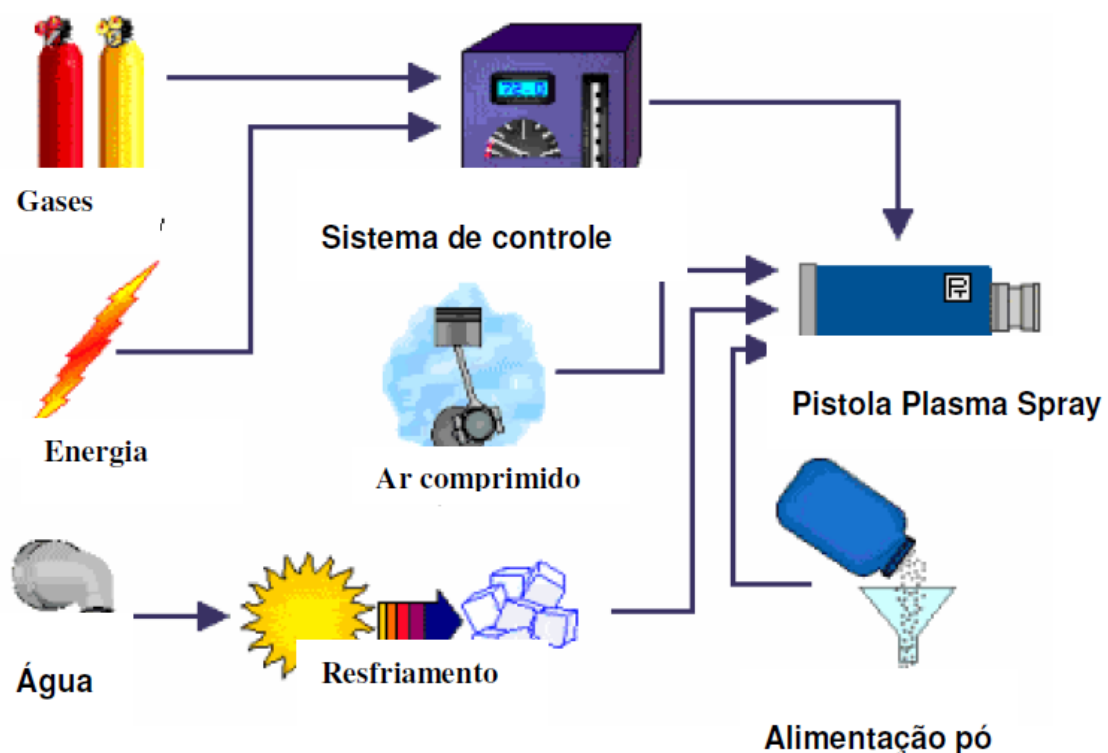


FIGURA 16: ESQUEMA DO PROCESSO DE PLASMA
FONTE: PAREDES (2009)

2.7.2.2 Arco Elétrico

No processo conhecido como ASP (Arc Spray Process – Processo de aspersão a arco), o arco elétrico é obtido por diferencial de potencial no bico de uma pistola onde chegam dois arames do material de deposição. Um forte jato de

ar comprimido é dirigido ao arco elétrico na região onde se funde o material, atomizando-o e projetando-o contra o substrato, como apresentado na Figura 17. Até o ponto de encontro os arames estão isolados um do outro e o arco é obtido por diferença de potencial, na faixa de 18 a 40 volts (PAREDES, 2009).

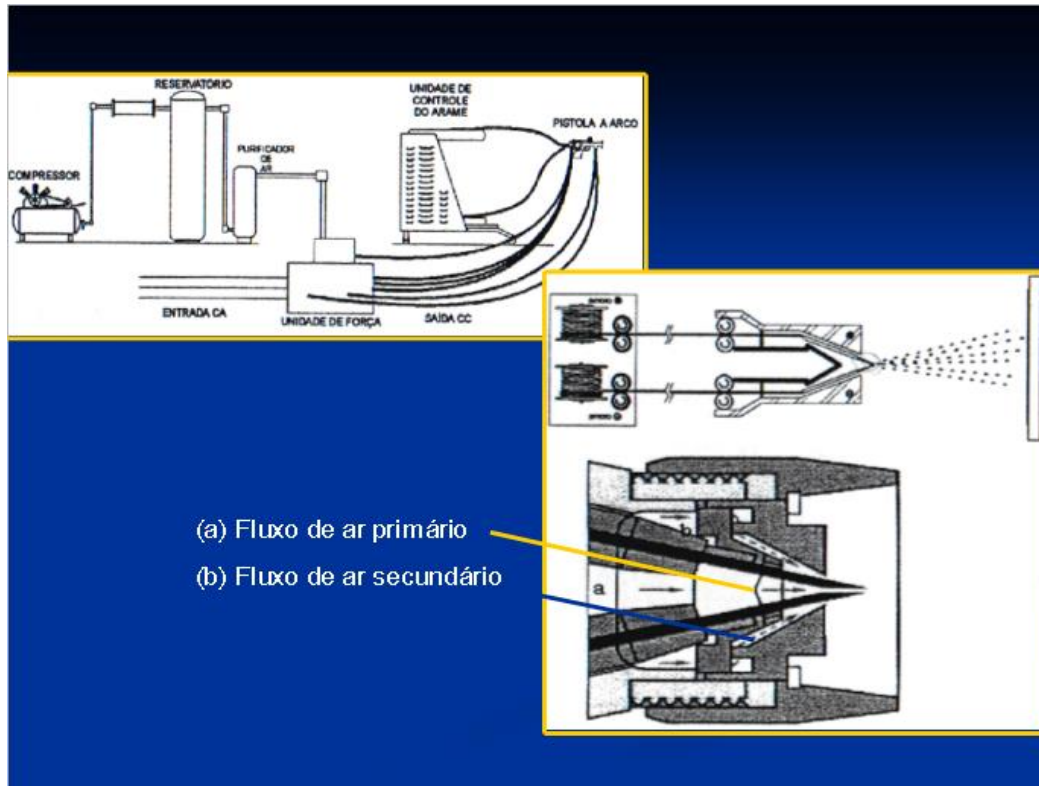


FIGURA 17: ESQUEMA DO PROCESSO DE POR ARCO ELÉTRICO
FONTE: PAREDES (2009)

2.7.2.3 Processos a chama: Chama convencional e chama HVOF

O processo de Aspersão por Chama Convencional - FS (*Flame Spray* – Aspersão por chama), também conhecido como processo à chama oxiacetilênica, é o processo de aspersão térmica mais simples e de menor custo e que será utilizado nesta pesquisa. Atinge uma menor temperatura e velocidade das partículas durante a deposição, comparado a outros processos, como o arco elétrico. Utiliza também a energia gerada pela combustão de um gás combustível misturado com o oxigênio ($C_2H_2 + O_2$) e pode utilizar material a ser fundido para a deposição na forma de pó ou arame (sólido ou tubular). Os materiais utilizados

podem ser metais, materiais cerâmicos e até alguns plásticos. Um esquema deste bocal é mostrado na Figura 18 (LUPOI et al., 2010; PAREDES et al., 2005).

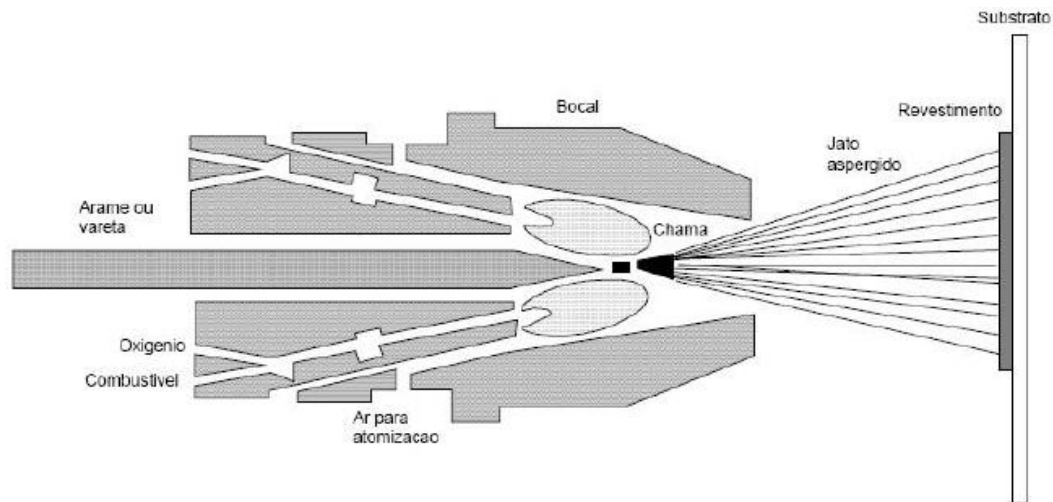


FIGURA 18: ESQUEMA DA PISTOLA COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME
FONTE: PAREDES (2009)

No processo FS com pó o revestimento tem menor resistência adesiva e menor resistência coesiva, e, em geral, maior porosidade devido às menores velocidades alcançadas pelas partículas. Assim, sua aplicação é recomendada em substratos metálicos quando são utilizados materiais chamados autofluxantes, sendo principalmente ligas à base de níquel (LUPOI et al., 2010; PAREDES et al., 2007). Um esquema do bocal é mostrado na Figura 19.

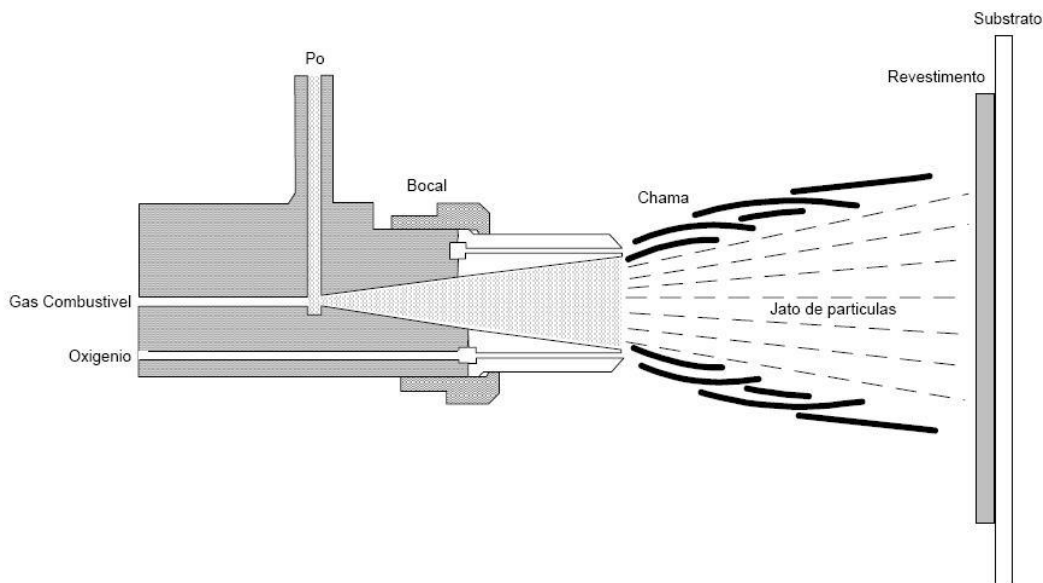


FIGURA 19: ESQUEMA DA PISTOLA COM ALIMENTAÇÃO DE PÓ
FONTE: PAREDES (2009)

Após a deposição dessas ligas com auxílio de maçaricos ou fornos, o revestimento é aquecido até sua fusão para a obtenção da sua densificação e aderência desejada. No entanto, a camada deste revestimento é limitada até a faixa de temperatura que não provoque a descamação do revestimento (LUPOI et al., 2010; PAREDES et al., 2007).

Por outro lado, o processo de Aspersão por chama de elevada velocidade – HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) pode utilizar a combustão de vários tipos de combustível, como querosene, acetileno ou propileno, gerando um gás quente de alta pressão, no qual o pó é injetado e acelerado através do eixo do bocal para ser depositado sobre o substrato (LUPOI et al., 2010). Na Figura 20 observa-se um esquema da pistola HVOF a qual utiliza o mecanismo Venturi para elevar a velocidade das partículas.

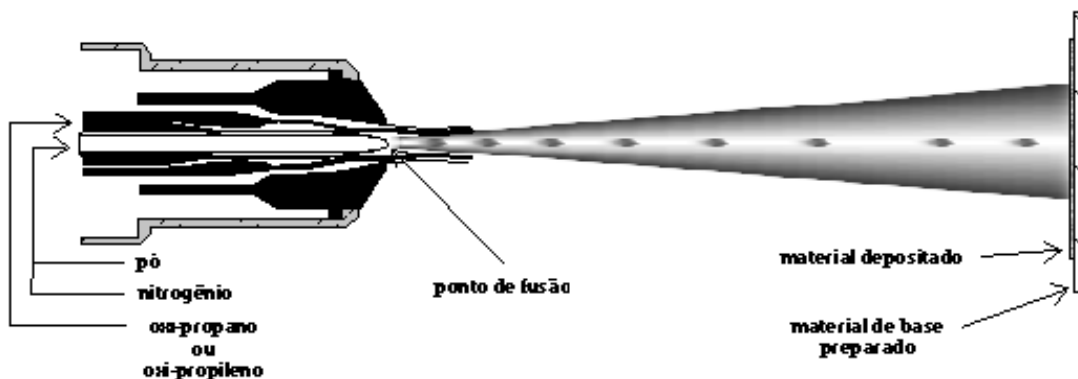


FIGURA 20: ESQUEMA DA PISTOLA HVOF A QUAL UTILIZA O MECANISMO VENTURI PARA ELEVAR A VELOCIDADE DAS PARTÍCULAS ASPERGIDAS
FONTE: PAREDES (2009)

2.7.2.4 Processo de pulverização a frio (*Cold Spray*)

O processo de pulverização a frio, ou spray frio (CS), foi desenvolvido em meados dos anos 1980 no Instituto de Mecânica Teórica e Aplicada da Academia Russa de Ciências (ABDULAZIZ et al., 2012). É um método de revestimento alternativo de mais alto custo que utiliza matéria-prima em pó, não fundida, acelerada à elevada velocidade através de gases que viajam em velocidades supersônicas, sendo estes normalmente o nitrogênio ou hélio, aquecidos por indução e emitidos por um bocal híbrido do tipo convergente-divergente-venturi.

O impacto das partículas com elevada energia cinética e térmica com o substrato resulta em deformação plástica severa para criação do revestimento. Estes revestimentos são tipicamente de alta aderência e com excelentes características mecânicas, podendo ser formados por metais como o alumínio e o titânio. A Figura 21 mostra um esquema do processo *Cold Spray* (LUPOI et al. 2010).

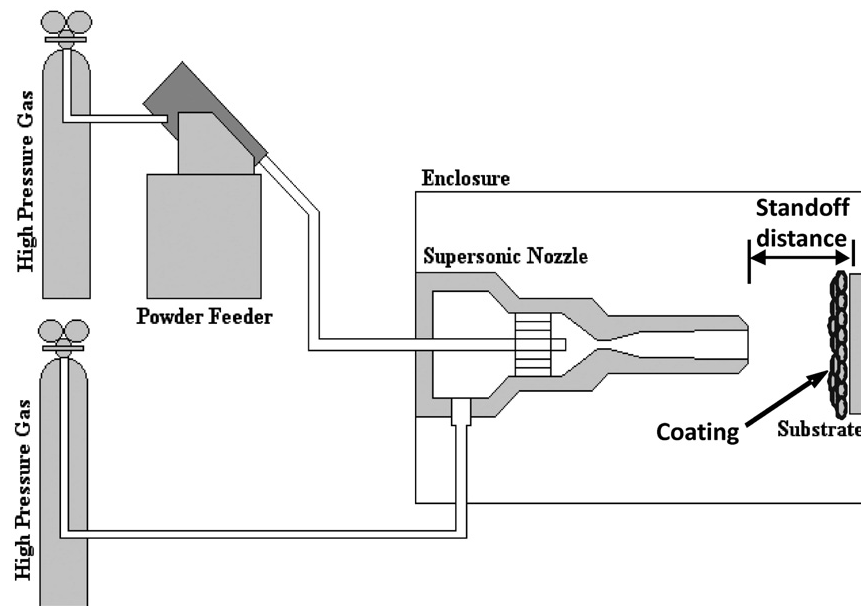


FIGURA 21: PROCESSO COLD SPRAY
FONTE: LUPOI et al. (2010)

2.7.3 Aspersão Térmica em Compósito

A fim de reduzir o peso, materiais leves como os polímeros têm sido utilizados nas últimas décadas em componentes de aviões, automóveis e no setor de energia. No entanto, suas aplicações são limitadas pela baixa resistência à erosão, condutividade elétrica e baixa temperatura de operação. A técnica de metalização da superfície do polímero é um caminho possível para melhorar as propriedades acima referidas (GANESAN et al., 2012).

Compósitos de matriz polimérica apresentam excelentes propriedades incluindo menor peso e maior relação resistência/peso. No entanto, a fraca resistência à abrasão, a baixa resistência à oxidação e à temperatura são os principais fatores que restringem aplicações mais abrangentes desses materiais.

Além disto, substratos poliméricos podem apresentar deposições ineficientes em virtude da baixa energia superficial dos polímeros, entre os quais destaca-se o polipropileno. No entanto, a utilização de serragem, mesmo em pequena concentração, aumenta ligeiramente a polaridade do polímero e favorece a adesão de revestimentos metálicos (ENCINAS et al., 2012).

Por este motivo, a modificação da superfície é uma alternativa encontrada para reforçar as propriedades dos compósitos através do depósito de um revestimento funcional sobre a superfície. Amplos estudos têm sido realizados sobre a preparação de revestimentos resistentes à erosão e revestimentos resistentes à oxidação em substratos formados por compósitos, usando diversas tecnologias de modificação de superfície (HUANG et al., 2012). Desta forma, é necessário obter uma modificação da superfície de forma a criar rugosidade na superfície do substrato, aumentando a área de contato, e, portanto, aumentando o número de possíveis ligações na interface entre o adesivo e o substrato (ENCINAS et al., 2012; GOMATHI et al., 2009; MOITA NETO, 2006).

Ataeefard et al. (2010) atribuem ao aumento da rugosidade de superfície a melhora da molhabilidade, pois a rugosidade da superfície pode aumentar o efeito de ancoragem e isto, por sua vez, influencia fortemente as propriedades adesivas. Packham (2003) avalia como o aumento da rugosidade superficial pode influenciar positivamente a adesão de revestimentos. A rugosidade pode variar na escala de centenas de nanômetros a micrômetros e pode ser eficaz por elevar a energia de átomos da superfície. As superfícies ásperas, quando estressadas, podem ser capazes de redistribuir a tensão de modo a aumentar a dissipação de energia durante uma falha da articulação (GOMATHI et al., 2009).

Isto também condiz com os estudos realizados por Harris et al. (1999), que exploraram e quantificaram possíveis correlações entre rugosidade e energia de superfície e aderência da camada de revestimento sobre um substrato. Neste estudo os autores demonstraram que a rugosidade de superfície aumenta a tensão superficial e cria ganchos mecânicos para a ancoragem da substância adesiva, criando travamento mecânico. Desta forma, de acordo com os autores, a utilização de alguma forma de abrasão, como um método de tratamento de superfície, é

recomendada por remover camadas contaminadas soltas além de fornecer pontos de fixação, ou ganchos, com o adesivo. Este aumento da rugosidade também aumenta a área de superfície em contato com o revestimento, podendo produzir alterações físico-químicas, ao alcançar maior energia de superfície e consequente maior molhabilidade, sendo, de imediato, percebidas mudanças na textura da superfície (HARRIS et al., 1999; PACKHAM, 2003).

Dentro deste contexto, Kim et al. (2010) também afirmam que as forças de adesão induzidas pelas atrações intermoleculares existentes entre um polímero e um metal, fornecem, através da penetração de material nos poros e crateras do substrato, um aumento na ligação por meio de bloqueio mecânico. Uma sugestão, de acordo com Harris et al. (1999), é que os picos, cordilheiras e asperezas formam barreiras que restringem o espalhamento da gota. A gotícula é direcionada, desta forma, às áreas da superfície onde pode se espalhar mais facilmente através de calhas e vales, talvez como resultado de canalização capilar (HARRIS, 1999).

Além disso, de acordo com Kim et al. (2010), uma vez que a distribuição de tensões na interface controla as características de deformação e de falha, fortes juntas adesivas podem ser alcançadas não só através de uma análise da morfologia da superfície do substrato e das propriedades mecânicas do revestimento, mas também pela otimização do conjunto ao transferir cargas via tensões de cisalhamento em toda a linha de ligação. É importante ressaltar que o intertravamento mecânico não é apenas um aspecto que rege o fenômeno da adesão, mas é o que promove, por adsorção, gasto energético, o que constitui praticamente a força de adesão (ENCINAS et al., 2012).

Pocius (1997) também defendeu o fenômeno da adesão por interações físico-químicas e não apenas por interações químicas. Além do jateamento (adesão física), é de grande importância a aplicação de primer (adesão química) para ocasionar a modificação do polímero (BALART et al., 2012; ENCINAS et al., 2012). Desta forma, para os autores, à medida que se aumenta a tensão superficial do polímero aumenta-se também seu contato molecular com o adesivo e consequentemente há incrementos nos níveis de adesão. Reforçando esta

teoria, Costa et al. (2014), que já tinham verificado aumento de 33% na adesão ao utilizar a limpeza do substrato com solventes e tinham verificado que esta adesão é triplicada ao se aplicar o jateamento abrasivo na superfície do polímero, conseguiram um acréscimo de 283% nos níveis de adesão, se comparado ao material sem qualquer tratamento, na aplicação de preparador de superfícies de origem olefínica (COSTA et al., 2014).

Packham (2003) destaca ainda a importância de se obter um ângulo de contato na aplicação de um adesivo ou revestimento sobre uma superfície, que seja o menor possível. Isto assegura, de acordo com o autor, o perfeito espalhamento do revestimento na área que se deseja recobrir. Assim, é possível entender porque uma superfície de poliolefina, tendo baixa tensão superficial, não é recoberta facilmente, pois, recobri-la significa fazer desaparecer uma superfície de baixa energia, estável, fazendo estender-se sobre ela uma outra superfície. Ainda, para que se torne mais fácil o espalhamento do adesivo sobre o polímero, é necessário alcançar pelo menos uma das três situações seguintes: aumentar a tensão superficial do polímero, reduzir a tensão superficial do adesivo ou reduzir a tensão interfacial entre adesivo e polímero. Se for possível conseguir todas estas situações o resultado se aproximará do ideal (PACKHAM, 2003).

Por outro lado, Salimi et al. (2011) afirmam que a adesão é afetada por muitos fenômenos, existindo um debate considerável na literatura sobre cada um dos mecanismos de adesão. A diversidade e a natureza interdisciplinar destes fenômenos torna difícil produzir uma única teoria ou mecanismo que explique as manifestações físicas e químicas que envolvem a adesão. Pois, embora a composição química e física das primeiras camadas atômicas determine a adesão; no caso de polímeros, a camada de baixo, a subsuperfície, em parte, controla as camadas exteriores. As reticulações e as ligações duplas restringem a mobilidade na subsuperfície, resultando na estabilização dos grupos funcionais na superfície. Salimi et al. (2011) também destacam que o efeito do substrato sobre a adesão do revestimento também pode ser considerado devido à existência das tensões internas, e, também, por causa da deformação plástica do revestimento dentro da camada. O motivo é, provavelmente, devido à presença de grupos

polares na cadeia do polímero que estão localizadas por baixo da superfície, sobre o qual a temperatura de ensaio no revestimento provoca relaxamento das tensões.

Em relação à ligação metal/polímero, Kim et al. (2010), que investigaram sistematicamente a influência de mecanismos de adesão sobre a força de adesão de uma ligação metal/ polímero, afirmaram que metais, como aço, alumínio, cobre e ouro são utilizados em quase todos os setores, e muitas vezes é necessário unir a esses metais outros materiais, como polímeros.

Lupoi et al. (2010) analisaram resultados experimentais com o alumínio, cobre e estanho e concluíram que o alumínio possui uma elevada velocidade de deposição devido ao seu baixo peso específico. E o cobre, com as mesmas características aplicadas ao alumínio, após o impacto no substrato, não adere com eficiência recuando para fora da superfície.

Pesquisadores como Ganesan et al. (2012) estudaram a metalização de superfície do polímero com cobre através da técnica de spray a frio, o que consideraram, ainda, como um desafio, para se conseguir uma camada de alta resistência de revestimento de metal sobre a superfície do polímero poli(cloreto de vinila) – PVC, devido a uma excessiva erosão de superfície durante o processamento. Os resultados mostraram que a deposição foi altamente sensível à temperatura do substrato.

Jordan et al. (2002) realizaram experiências focando em cobre puro para eliminar quaisquer influências dos elementos de liga ou reações. Constataram a formação de uma microestrutura, com porosidade, muito sensível ao superaquecimento da fusão e à pressão do gás. O aumento do sobreaquecimento do fundido e da pressão do gás resultou em depósitos densos e de granulação grossa. Ao reduzir a temperatura de fundição, ou aumentar a pressão do gás, teve-se como resultado uma estrutura de grão fino, porém, com muitos poros e presença de irregularidades (JORDAN et al., 2002).

3 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

As contribuições desta tese incluem o estudo dos parâmetros que afetam as propriedades de filamentos de compósitos PP/serragem que serão revestidos por Al ou Cu através do processo de aspersão térmica à chama. Uma vez obtidas as melhores condições de preparação dos filamentos, peças com geometrias variadas podem ser formadas, sendo estas peças perfis ou não. Foi mostrado também pelo nosso grupo de pesquisa que, mesmo sem a utilização de moldes, é possível moldar peças termoplásticas através da manipulação de filamentos viscosos oriundos de uma extrusora, e, assim, uma patente foi depositada sobre esse novo processo de moldagem. Nessa patente de invenção, BR 1020150076959, depositada em 7/4/2015 e intitulada “Processos de moldagem para obtenção de peças plásticas poliméricas revestidas ou não com metais a partir de filamentos poliméricos”, está contemplado o revestimento metálico subsequente das peças produzidas com filamentos através do uso do processo de aspersão térmica à chama.

Finalmente, esta pesquisa contribui para estudos futuros que podem responder qual a viabilidade econômica do novo processo de moldagem desenvolvido, principalmente para polímeros reciclados, que são usados na confecção de peças, sem a necessidade da etapa de resfriamento, granulação e novo processamento via injeção, termoformação ou outro processo de moldagem para a obtenção da peça final.

4 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

4.1 MÉTODO DE PESQUISA

Esta pesquisa tem característica exploratória, pois foram pesquisadas diferentes formas de preparar filamentos de plástico/madeira que pudessem ser usados para produzir peças plásticas, e, que em seguida, seriam revestidas com Al ou Cu através do processo de aspersão térmica à chama, de forma a alcançar propriedades mecânicas suficientes e revestimentos adequados. Para isto, foram experimentadas três diferentes composições de plástico/madeira para a obtenção de uma flexibilidade adequada, sendo também necessário avaliar alguns parâmetros, que interferem no processo de obtenção destes filamentos e no revestimento através da aspersão térmica, como a temperatura, absorção de água, homogeneidade, resistência mecânica e degradação da madeira. Por fim, após a aplicação de revestimento de Al ou Cu sobre os filamentos caracterizados, foram analisados os resultados em relação ao aumento da resistência mecânica das peças e a valorização do elemento estético.

Entretanto, em todo o processo de produção e caracterização dos filamentos, obtidos diretamente da extrusora através de material viscoso, e da aplicação de revestimento nestes materiais, não foi possível manipular o comportamento de forma precisa, em especial no que concerne à confecção de corpos de prova, que foram preparados no formato de filamentos, e não de acordo com a forma e medidas específicas regidas pelas normas padrões. Assim, ensaios de tração, absorção de água e densidade foram realizados com amostras no formato de filamentos, respeitando a quantidade mínima de corpos de prova estipulada pelas respectivas normas padronizadas para cada ensaio, não com o objetivo de desenvolvimento de compósitos PP/serragem que é um tema já estudado por nosso grupo de Pesquisa (NALDONY et al., 2015; SANTOS, 2011; SANTOS et al., 2015a; SANTOS et al., 2015b), mas sim, sua utilização no processo de aspersão térmica à chama. Por este motivo, o método de pesquisa será o quase experimento.

4.2 MATERIAIS

4.2.1 Fibras de Madeira

As fibras de madeira utilizadas no presente trabalho são da espécie *Pinus Elliotti*, obtidas na empresa Centeri. O material foi seco durante 22 h à temperatura de 60°C.

A distribuição granulométrica, que foi realizada por um aluno do Grupo de Pesquisa de Materiais Poliméricos (SANTOS, 2011), mostrou que 33% p/p das fibras de madeira eram compostas por partículas com tamanho inferior a abertura de malha da peneira de 60 mesh, 40% p/p das partículas tinham o tamanho situado entre a abertura de malha da peneira de 60 e 40 mesh e os 27% restantes eram de partículas com tamanhos maiores que a abertura de malha da peneira de 40 mesh. O tamanho das peneiras de 40 e 60 mesh correspondem aos tamanhos de 0,420 e 0,250 mm, respectivamente (SANTOS, 2011; MSPC, 2009). Esta distribuição no tamanho das partículas das fibras de madeira, utilizadas nesta pesquisa, pode ser conferida no gráfico da Figura 22.

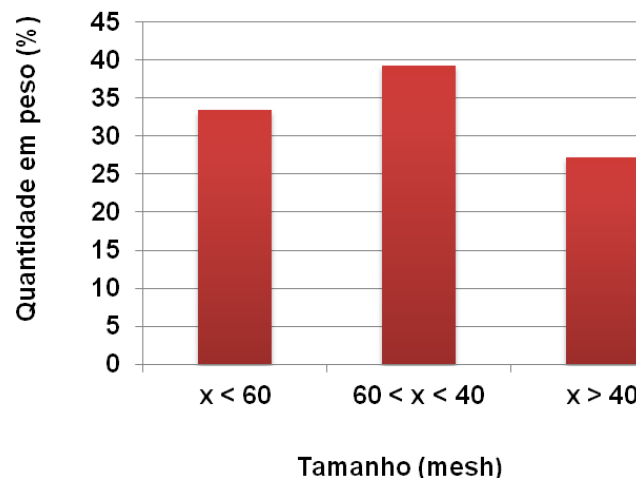


FIGURA 22: RESULTADO DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA SERRAGEM
FONTE: SANTOS (2011)

4.2.2 Polipropileno

O polipropileno utilizado nesta pesquisa é da marca Brasken H 503, cujas propriedades dadas pelo fabricante estão listadas na Tabela 2 a seguir:

TABELA 2: PROPRIEDADES DO POLIPROPILENO DA MARCA BRASKEN H 503

Propriedades Típicas		Índice de Fluidez (230 °C / 2,16 kg)	Densidade ^a	Módulo de Flexão Secante 1 % ^a	Resistência à Tração no Escoramento ^a	Alongamento no Escoramento ^a	Distribuição de Pesos Moleculares
Método ASTM		D 1238	D 792A	D 790A	D 638	D 638	
Unidades		g/10 min	g/cm ³	MPa	MPa	%	
	H 503	3,5	0,905	1300	35	11	Normal
		Monofilamento para cordas, cabos de amarração, redes de pesca, cerdas para escovas e vassouras.					

FONTE: BRASKEM (2015)

4.2.3 Compatibilizante

O compatibilizante polipropileno maleatado (PPMA) utilizado nesta pesquisa foi preparado através de extrusão reativa por um aluno do Grupo de Pesquisa de Materiais Poliméricos (SANTOS, 2011). O compatibilizante, para uso nesta pesquisa, foi misturado com o polímero e a serragem em um saco plástico e, em seguida, o material foi processado em condições que permitissem a obtenção de filamentos. Foram analisadas várias composições de compatibilizantes para a preparação dos compósitos PP/ Serragem, porém, para esta pesquisa, apenas o compatibilizante F2 e o F5 foram testados. A Tabela 3 apresenta o compatibilizante PPMA comercial e a composição dos compatibilizantes testados nesta pesquisa.

TABELA 3: COMPOSIÇÃO DOS COMPATIBILIZANTES TESTADOS NESTE TRABALHO EM COMPARAÇÃO AO COMPATIBILIZANTE COMERCIAL

PPMA	PP	Anidrido Maleico	Peróxido Dicumila
F1 (PPMA comercial)	99,43%	0,57%	
F2	99,5%	0,5%	
F5	98,5%	1,0%	0,5%

FONTE: SANTOS (2011)

A Tabela 4 apresenta as condições de temperatura e velocidade de rotação da rosca da extrusora para o processamento utilizado na preparação dos compatibilizantes F2 e F5. Os detalhes da preparação e caracterização dos compósitos e compatibilizantes são descritos na literatura (SANTOS et al., 2015a; SANTOS et al., 2015b).

TABELA 4: CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO DOS COMPATIBILIZANTES PPMA F2 E F5 NA EXTRUSÃO REATIVA

PPMA	Rotação (rpm)	Zona 1 (°C)	Zona 2 (°C)	Zona 3 (°C)	Cabeçote (°C)
F2	40	167	167	166	160
F5	53	190	190	190	190

FONTE: SANTOS (2011)

O índice de fluidez dos compatibilizantes foi medido de acordo com a norma ASTM D1238 no Laboratório de Materiais da Renault do Brasil S.A. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5: INDICE DE FLUIDEZ DAS AMOSTRAS DE PP, PPMA COMERCIAL E PPMA F2 E F5

Amostra de PPMA	Índice de Fluidez (g/10 min)
PP	3,2
F1 (PPMA Comercial)	54,0
F2	5,5
<u>F5</u>	27,8

FONTE: TROMBETA (2010)

Desta forma, na primeira etapa desta pesquisa, foi feito o teste com o compatibilizante F2, porém, como seu índice de fluidez é menor do que o do compatibilizante F5, e, para que ocorresse uma melhor dispersão das fibras de madeira, foi utilizado o compatibilizante F5 para a preparação dos compósitos da segunda e terceira etapas. Além disso, dentre as várias composições de compatibilizantes testadas por Santos (2011), o compatibilizante F5 foi o que produziu compósitos PP/ serragem com as melhores propriedades mecânicas e com menor absorção de água (SANTOS et al., 2015a; SANTOS et al., 2015b).

4.3 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS

4.3.1 Preparação dos Filamentos

Foram realizadas três etapas de ensaios nesta pesquisa, assim como apresentado no esquema da figura 23.

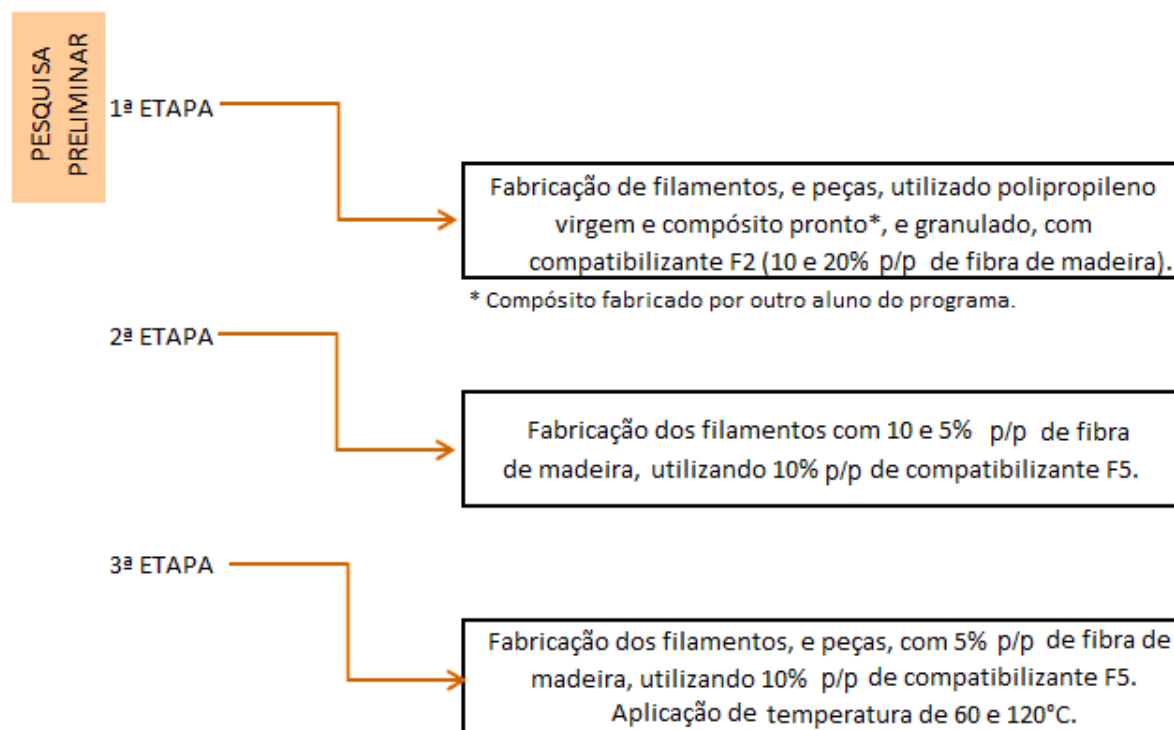


FIGURA 23: ESQUEMA DAS TRÊS ETAPAS DE FABRICAÇÃO DOS FILAMENTOS

Os filamentos foram produzidos em uma extrusora monorosca da marca Teck Tril modelo EMT 25 com a relação L/D igual a 30 (Figura 24a). Todos os compósitos, de todas as etapas, tiveram a adição de 10% p/p de compatibilizante (PPMA). A granulação foi feita utilizando um granulador que está acoplado à extrusora (Figura 24b).

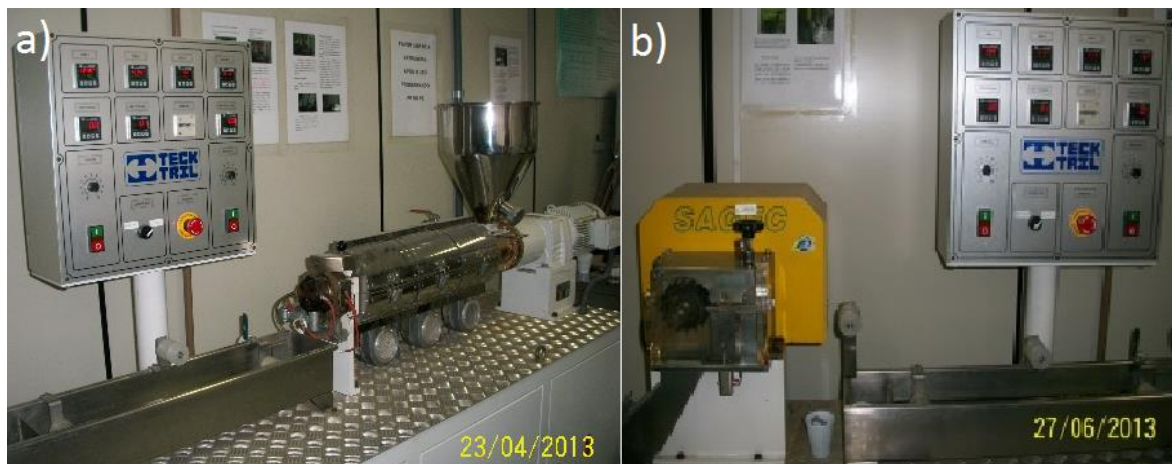


FIGURA 24: a) EXTRUSORA MONOROSCA - TECK TRIL MODELO EMT 25. b) GRANULADORA

A segunda e terceira etapas apresentam diferença em relação ao reprocessamento do material, sendo que na segunda etapa o material foi processado apenas duas vezes, e na terceira etapa de fabricação, os compósitos foram processados três vezes, considerando o processamento inicial das fibras de madeira com o compatibilizante, assim como apresentado na figura 25. O reprocessamento melhora a homogeneização do compósito (reduz a concentração de fibras de madeira ao longo do filamento), tendo em vista o curto tempo de residência da extrusora do laboratório.

Uma diferença adicional, entre a segunda e a terceira etapa de fabricação dos filamentos, que também é exemplificado no esquema da figura 25, é referente à aplicação do compatibilizante, que na segunda etapa foi misturado à farinha de madeira e ao restante do PP virgem simultaneamente, e, na terceira etapa, primeiramente foi misturado às fibras.

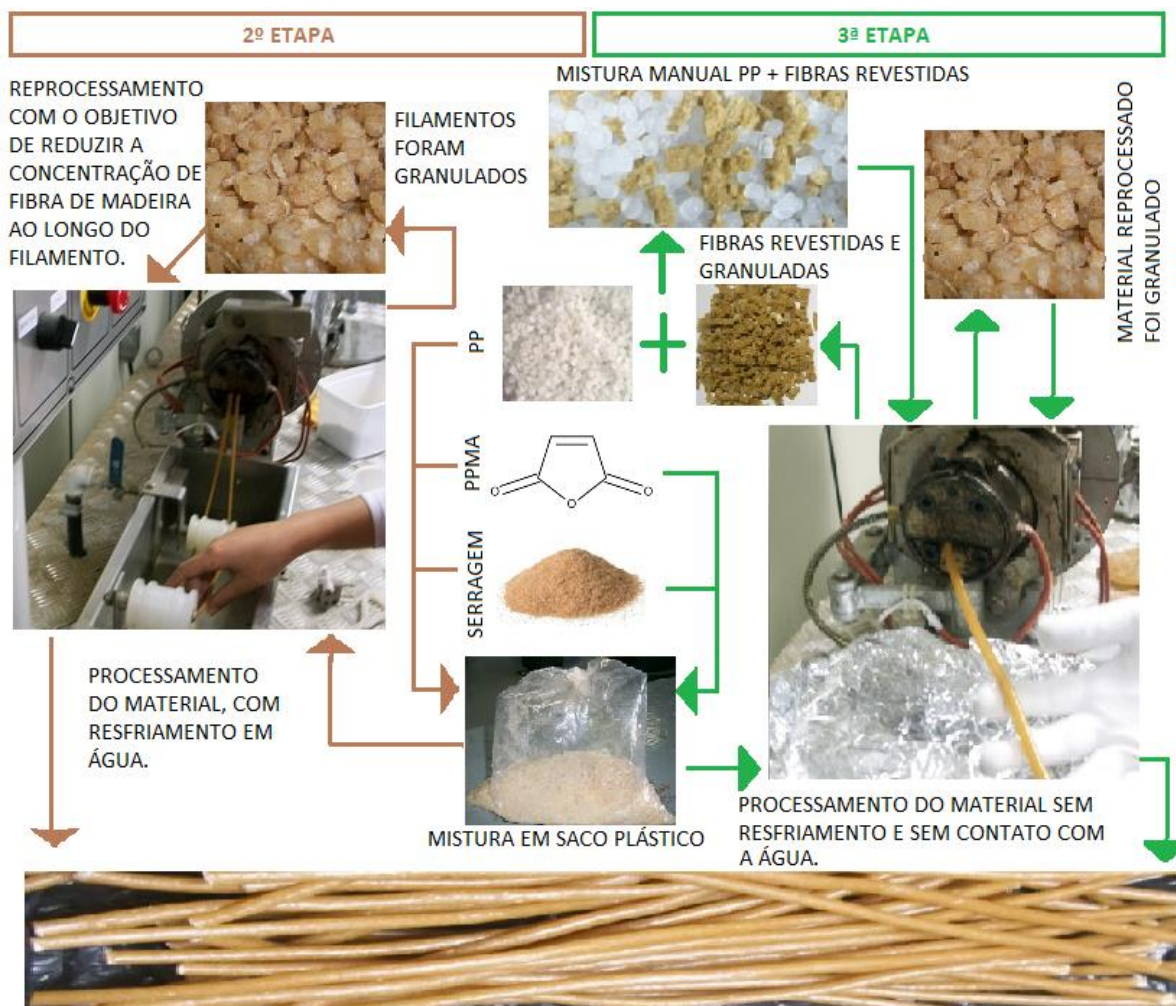


FIGURA 25: ESQUEMA PARA COMPARAÇÃO DO PROCESSAMENTO ENTRE A SEGUNDA E A TERCEIRA ETAPA DESTA PESQUISA

Estudos anteriores mostraram que o revestimento das fibras de madeira com o compatibilizante facilita a dispersão das fibras na matriz de PP. Ademais, uma boa adesão na interface fibra/matriz é essencial para o alcance de boas propriedades mecânicas dos compósitos, e, assim, o efeito da adição do PPMA é maior se este é misturado às fibras de madeira (revestimento das fibras com PPMA) em etapa anterior à adição da matriz de PP, em vez de ser diluído junto com a matriz (SANTOS et al., 2015a; SANTOS et al., 2015b).

4.3.2 Controle da Temperatura dos Compósitos

Devido a resultados insatisfatórios da segunda etapa, na qual os filamentos processados foram submetidos apenas à temperatura de 60°C, a terceira etapa de

análise avaliou a influência da temperatura nos filamentos e o que isto impacta em suas propriedades (Figura 26). Para isto os filamentos foram submetidos à temperaturas de 60°C e 120°C.

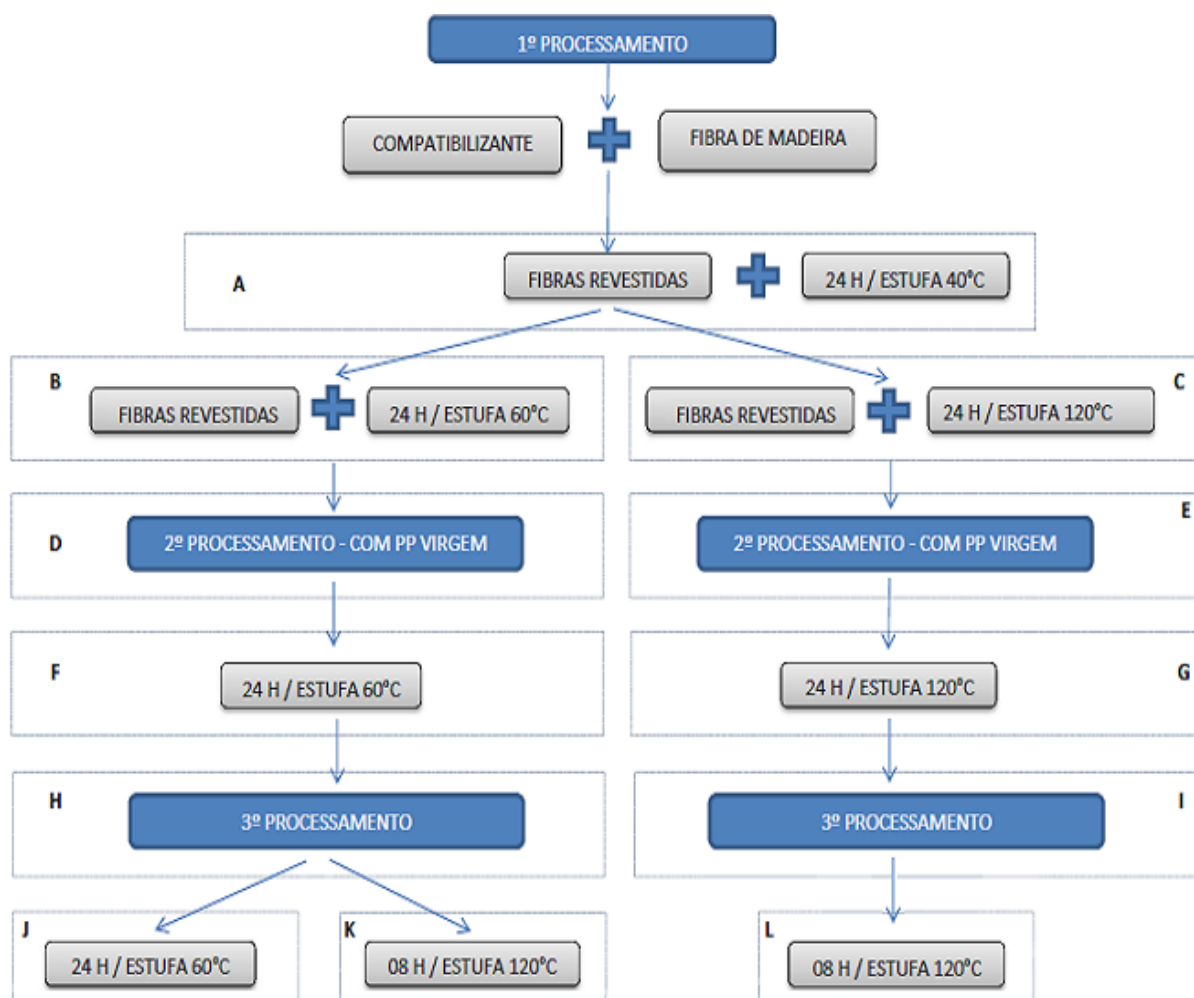


FIGURA 26: FASES DESENVOLVIDAS NA TERCEIRA ETAPA

4.3.3 Controle da Umidade das Fibras de Madeira e nos Compósitos

A absorção de água por fibras vegetais nos compósitos de matriz polimérica reforçados por essas fibras reduz a resistência do compósito e afeta o processo de aspensão térmica. Assim, o esquema da Figura 27 mostra o processo de secagem de fibras de madeira utilizado na terceira etapa de fabricação dos filamentos.

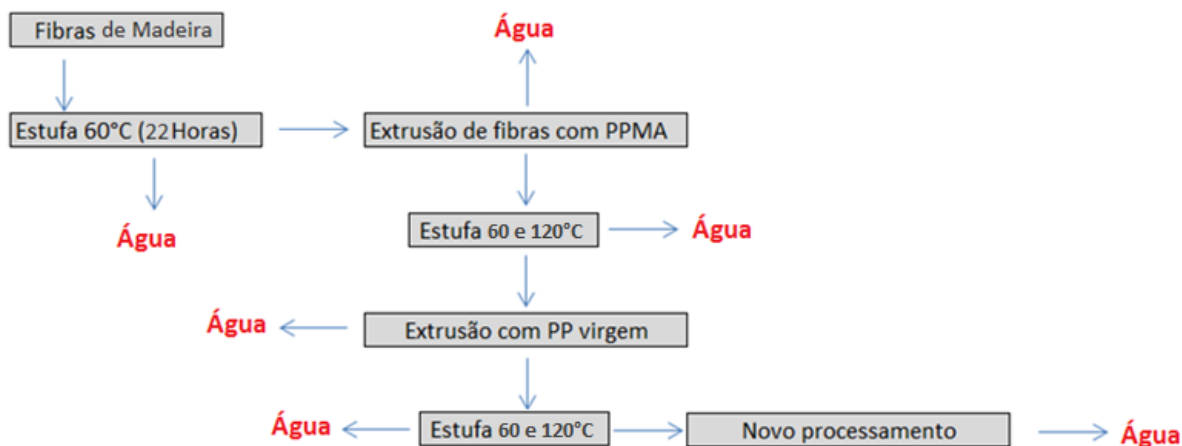


FIGURA 27: PROCESSO DE RETIRADA DE ÁGUA

Desta forma, para garantir que as fibras de madeira e compósitos apresentassem o menor teor possível de água, as fibras foram previamente secas em temperaturas de 60°C por 22 h, sendo, após isto, imediatamente misturadas com o compatibilizante e processados na extrusora para a preparação dos compósitos, sem serem resfriados em água após o processamento. Na sequência foram encaminhados diretamente para a granuladora, sendo, após isto, recolocados na estufa a 60 e 120°C (material dividido em duas partes iguais).

Estes grânulos, após mais 24 h na estufa, foram reprocessados com o polipropileno virgem para a produção de filamentos compósitos sem contato com a água. Estes grânulos foram novamente colocados em estufa na temperatura de 60 e 120°C, sendo, na sequência, novamente reprocessados. Os filamentos obtidos neste terceiro processo não mais foram granulados, pois foram retirados os corpos de prova em forma de filamento para ensaios. A secagem dos compósitos que passaram por temperatura a 120°C foi feita na estufa do laboratório de Aspersão Térmica e a secagem das fibras de madeira e dos compósitos que passaram por temperatura a 60°C foi feita na estufa do laboratório de polímeros.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Para caracterização dos compósitos, produzidos na segunda e terceira etapa desta pesquisa, foram analisadas as propriedades mecânicas de resistência

à tração, micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV), densidade relativa, ensaio de absorção de água, ensaio de dobramento, difratometria de raios-X e análise da rugosidade através de perfilometria.

4.4.1 Caracterização Mecânica por Ensaio de Tração

A caracterização mecânica por ensaio de tração foi realizada em filamentos da segunda etapa de análise. Os corpos de prova foram em forma de filamentos, sendo utilizados pelo menos 05 corpos de prova de acordo com a norma ASTM D638, a qual também define a velocidade de ensaio como sendo 50 mm/min, utilizando uma carga de 5 N. Foi utilizada temperatura de 20°C e umidade relativa do ar de 59%. Não foi utilizado extensômetro. O ensaio de tração foi desenvolvido no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC).

4.4.2 Caracterização Física por Microscopia Eletrônica de Varredura

Imagens obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram utilizadas para avaliação das superfícies de fratura das amostras do compósito para avaliação da adesão fibra/matriz e para verificação da adesão do revestimento metálico na superfície dos filamentos. Para as análises foram consideradas as superfícies de fratura (topo) e o substrato de amostras preparadas na segunda e na terceira etapa desta pesquisa. Todas as amostras foram analisadas através do microscópio eletrônico de Varredura do LACTEC, sendo anteriormente metalizadas com ouro.

4.4.3 Caracterização dos compósitos por Densidade Relativa

A determinação da densidade relativa foi realizada com amostras em formato de filamentos, sendo utilizados cinco corpos de prova para cada amostra, de acordo com a norma NBR-11936. O ensaio foi realizado no Laboratório de Polímeros do Programa de Engenharia Mecânica da UFPR.

4.4.4 Densidade dos Filamentos

Foram verificadas as densidades experimentais dos materiais compósitos de acordo com a norma ASTM D 2395-93, tendo como exceção o formato dos corpos de prova. O método utilizado foi o de volume deslocado por imersão em água, no qual a amostra seca em formato de filamento foi pesada em uma balança analítica e em seguida totalmente imersa em água destilada dentro de uma proveta graduada. A variação do volume de água na proveta corresponde ao volume da amostra, considerando-se que a água destilada apresenta o valor de densidade de 1,0 g/mL na temperatura ambiente. O ensaio foi realizado no Laboratório de Polímeros do Programa de Engenharia Mecânica da UFPR e os cálculos foram realizados de acordo com a equação 1.

Equação 1:

$$\rho_C = \frac{M_S}{V_W}$$

Onde:

ρ_C = densidade experimental compósito

M_S = massa da amostra

V_W = variação do volume de água deslocado na proveta

Também foram realizados os cálculos para os resultados da densidade teórica dos compósitos através da equação 2. Os resultados foram comparados aos valores experimentais alcançados pela equação 1.

Equação 2:

$$\frac{1}{\rho_C} = \frac{W_{PP}}{\rho_{PP}} + \frac{W_{PPMA}}{\rho_{PPMA}} + \frac{W_S}{\rho_S}$$

Onde:

ρ_C = densidade teórica do compósito

ρ_{PP} = densidade do polipropileno

ρ_{PPMA} = densidade da amostra de PPMA

ρ_S = densidade teórica da serragem

W_{PP} = fração em massa do polipropileno

W_{PPMA} = fração em massa do PPMA

W_S = fração em massa da serragem

4.4.5 Absorção de Água no Compósito

Para a determinação da absorção de água do compósito utilizou-se a norma NBR 14810-3 – painéis aglomerados, no que diz respeito ao tempo em que as amostras ficaram submersas e à propriedade da água utilizada. Porém, os corpos de prova utilizados foram em forma de *pellets*. O ensaio foi realizado no Laboratório de Polímeros do Programa de Engenharia Mecânica da UFPR.

A aparelhagem necessária para execução deste ensaio foi uma balança analítica, um recipiente com água destilada e com temperatura controlada, e, dispositivo (fitas colocadas de forma a permitir a passagem da água) para manter o corpo de prova submerso no recipiente.

Os corpos de prova foram pesados e colocados por 24 h em imersão, sendo, após isto, retirados do recipiente, realizada a remoção do excesso de água, e obtidas novas massas. Para realização dos cálculos de absorção de água foi utilizada a equação 3:

Equação 3:

$$A = \frac{(M1 - M0)}{M0} \times 100$$

Onde:

A = absorção de água dos corpos-de-prova.

M1 = massa do corpo-de-prova após o período de imersão considerado.

M0 = massa do corpo-de-prova antes da imersão.

4.4.6 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento consiste em submeter um corpo de prova a uma deformação plástica por flexão, momento em que parte do corpo de prova é tracionado enquanto o lado oposto é comprimido. Ao acomodar-se o corpo de prova em dois apoios afastados a uma distância especificada, e dobrá-lo por intermédio de um cutelo que aplica um esforço de flexão no centro do corpo, é atingido o ângulo de dobramento especificado. A velocidade do ensaio não constitui um fator de relevância, desde que o ensaio não seja realizado com uma

velocidade extremamente alta que possa enquadrá-lo em ensaios dinâmicos (Figura 28a e 28b).

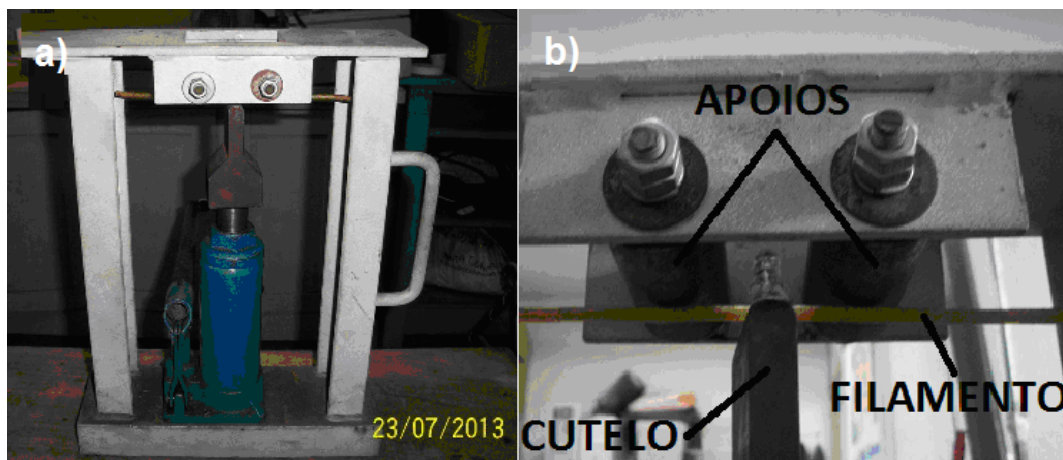


FIGURA 28: a) MÁQUINA DE DOBRAMENTO UNIVERSAL. b) CORPO DE PROVA ACOMODADO ENTRE APOIOS E CUTELO DA MÁQUINA DE DOBRAMENTO

Embora forneça apenas resultados qualitativos, o ensaio de dobramento é um meio bastante simples e eficaz para detectar problemas nos revestimentos, além de verificar a capacidade de deformação e de obter valores comparativos de ductilidade dos materiais. O corpo de prova, para o ensaio de dobramento, pode ser retirado do produto acabado, ou, pode ser o próprio produto, como por exemplo, parafusos, pinos ou barras que apresentem dimensões adequadas para serem colocados na máquina.

Para analisar o resultado do ensaio, examina-se a olho nu a zona tracionada do corpo de prova, estando aprovado na ausência de trincas ou descontinuidades acima de um determinado valor especificado. O resultado do ensaio é considerado reprovado se o corpo de prova apresentar algum destes defeitos ou se romper antes de atingir o ângulo especificado.

Nesta pesquisa, corpos de prova, na forma de filamentos, com e sem revestimento de alumínio, foram submetidos ao ensaio de dobramento, no Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O objetivo da análise foi verificar a influência da temperatura de secagem dos filamentos no seu desempenho mecânico, e, também, avaliar a flexibilidade dos filamentos com e sem revestimento com alumínio.

4.4.7 Análise por Difratometria de Raios-X

Amostras com 10 e 20% p/p de fibras de madeira (segunda etapa) e amostras com 5% p/p tratadas à temperatura de 60°C e 120°C (terceira etapa) foram analisadas através de difratometria de Raios-X. O Método para determinação da cristalinidade foi o da razão de áreas, obtidos pelo software EVA da Bruker, no Laboratório de Óptica de Raios X no Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná. Para realização das medidas as amostras foram lixadas, de forma a conseguir uma superfície plana.

4.4.8 Análise dos Revestimentos metálicos dos Filamentos de Compósitos

Para identificar as características da morfologia dos revestimentos aspergidos e avaliar os produtos de corrosão formados sobre a superfície dos revestimentos, foram utilizados os registros fotográficos do MEV. Os revestimentos também foram caracterizados em relação à aderência através do ensaio por dobramento, conforme a norma MILITARY STANDARD 2138.

4.4.9 Caracterização Microestrutural do Revestimento

A microestrutura da superfície foi analisada utilizando microscopia eletrônica de varredura e a rugosidade do substrato, que pode ser considerada como uma propriedade do revestimento, e que pode dar indicações sobre a qualidade do mesmo. A rugosidade medida através do ensaio de perfilometria, não sendo possível o uso de rugosímetro de contato devido ao formato de filamento dos corpos de prova.

Para a perfilometria foi utilizado perfilômetro DEKTAKXT, marca Broker. Ponteira de diamante de 2 micrometros de diâmetro, com força de 5 mg. Cada medida teve duração de 2 min, sendo analisado 1 mm de comprimento. As medidas de rugosidade (R_a e R_q) foram realizadas em 3 pontos de cada amostra, sendo um no meio da amostra e dois a cerca de 10 mm de cada extremidade, de forma a conseguir uma média mais confiável. Neste ensaio foram analisados os filamentos com 5 e 10% p/p de madeira, sendo peças da segunda e terceira etapas de fabricação.

5 APLICAÇÃO

5.1 FABRICAÇÃO DOS FILAMENTOS

5.1.1 Características Gerais

Inicialmente imaginou-se fabricar filamentos com e sem acréscimo de fibra de madeira e após os mesmos estarem prontos, formar peças tridimensionais. Porém, os filamentos com fibras de madeira apresentaram-se rígidos após a extrusão, o que dificultou o desenvolvimento de tramas, além de ficarem frágeis, ocasionando a sua quebra. Isto foi verificado com maior intensidade nos filamentos fabricados com quantidades maiores de serragem. Desta forma, pensou-se na utilização dos filamentos ainda quentes para formar as peças, ou seja, as peças foram formadas no mesmo momento que os filamentos foram produzidos, e, com eles ainda quentes, a adesão entre os mesmos ficou favorecida e a peça formada ganhou resistência em relação aos filamentos individuais; sendo, em alguns casos, utilizados moldes que não se deformavam com a temperatura dos filamentos. Após as peças serem resfriadas, as mesmas eram retiradas dos moldes.

5.1.2 Fabricação dos Filamentos na Primeira Etapa

Como pesquisa preliminar, foram realizados alguns testes em laboratório para a produção de filamentos fabricados com compósito de poliolefina (PP) virgem e fibras de madeira *Pinus Elliotti*. Inicialmente, estimou-se o uso de até 20% p/p de madeira na quantidade total do compósito, e assim, neste ensaio preliminar, foram estipuladas duas quantidades de fibra vegetal, sendo elas de 10% e 20% p/p em peso. Nesta etapa, nas duas quantidades de fibra de madeira no compósito, foi utilizado o compatibilizante F2.

Os filamentos foram produzidos na extrusora (Figura 29) com a utilização de compósitos anteriormente fabricados por outro aluno do grupo de pesquisa em polímeros da UFPR (SANTOS, 2011).



FIGURA 29: FILAMENTOS SENDO PRODUZIDOS EM EXTRUSORA TECK TRILL EMT

5.1.3 Fabricação dos Filamentos na Segunda Etapa

Foram analisadas duas quantidades de madeira (5 e 10% p/p) para avaliar o quanto a variação da concentração de fibras de madeira no compósito PP/fibras de madeira influenciaria na maleabilidade e na resistência dos filamentos. Foi aplicado o compatibilizante F5 em vez do F2 (utilizado na primeira etapa), devido ao fato que estudos anteriores mostraram que o F5 é mais eficiente (Santos et al., 2015a). Este compatibilizante já estava pronto no laboratório, pois foi resultado da pesquisa de outro aluno do programa (SANTOS, 2011). A mistura das fibras de madeira, dos grânulos de PP e do compatibilizante F5, também na forma de *pellet*, foi realizada utilizando-se um saco plástico. O uso de um misturador foi descartado devido à grande facilidade com que o pó de madeira tem de se aglomerar e se separar dos *pellets* de polipropileno e do compatibilizante.

O cálculo das quantidades em peso para compor as misturas foi feito da seguinte maneira: primeiro utilizou-se a quantidade de dois copos do tipo *beckers* de PP para formar a matriz, totalizando uma massa de 353,29 g. A partir deste valor, e com uma conta simples de regra de três, apresentada na equação 4, obtiveram-se as massas para a fibra de madeira seca e para o compatibilizante.

Equação 4:

$$\frac{353,29}{0,85} = \frac{m_{mad}}{0,05} = \frac{m_{comp}}{0,1}$$

A Tabela 6 mostra os valores pretendidos (calculados) e os valores que realmente foram inseridos na mistura, devido à dificuldade de se obter a massa precisamente para o compósito com 5% p/p de fibra de madeira. Utilizou-se uma balança analítica.

TABELA 6: VALORES PARA A MISTURA COM 5% DE MADEIRA

	Composição pretendida % p/p	Massa calculada (g)	Massa pesada, real (g)	Composição real % p/p
PP	85,0	353,29 (inicial)	353,29	85,4
Madeira	5,0	20,78	19,92	4,8
Compatibilizante	10,0	41,56	40,32	9,8
Total	100,0	415,63	413,53	100

A segunda mistura, utilizando 10% p/p de madeira, foi feita através de procedimento igual ao aplicado para a mistura com 5% p/p de madeira, porém, utilizou-se uma massa inicial de PP de 272,56 g. A Tabela 7 apresenta os valores encontrados.

TABELA 7: VALORES PARA A MISTURA COM 10% DE MADEIRA

	Composição pretendida % p/p	Massa calculada (g)	Massa pesada, real (g)	Composição real % p/p
PP	80,0	272,56 (inicial)	272,56	80,2
Madeira	10,0	34,07	33,21	9,8
Compatibilizante	10,0%	34,07	33,90	10
Total	100,0%	340,70	339,67	100

A temperatura utilizada para a extrusão dos filamentos foi de 175°C, com exceção da temperatura do cabeçote que foi de 168°C, como apresentado na Tabela 8.

TABELA 8: PERFIL DE TEMPERATURA DA EXTRUSORA

Rotação (rpm)	Zona 1 (°C)	Zona 2 (°C)	Zona 3 (°C)	Cabeçote (°C)
85	175	175	175	168

Antes de reprocessar os grânulos de compósito foi necessário colocar os mesmos na estufa para remoção da umidade absorvida do ar. O material ficou por 48 h na estufa a uma temperatura de 60°C. Após esta etapa o material passou por novo processamento, seguindo as mesmas orientações do primeiro processo.

Foram, então, separadas as amostras para os ensaios a serem realizados. Os corpos de prova fabricados não seguiram o padrão de formato definido pela norma MB-4 da ABNT, assim como pode ser verificado na figura 30, que apresenta a diferença entre o corpo de prova regulamentado para o ensaio de tração para seções circulares e o corpo de prova utilizado nesta pesquisa. Para o ensaio foram testadas “garras” utilizadas para corpo de prova tradicional (Figura 30a) e “garras” utilizadas para análise de filamentos, sendo que ambos os tipos foram aceitáveis.

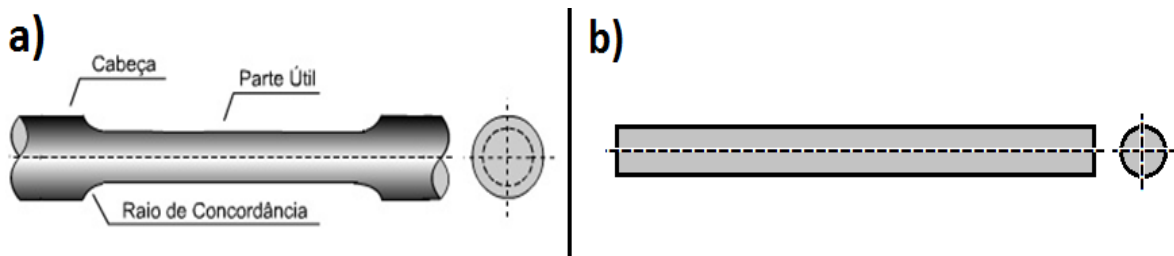


FIGURA 30: a) CORPO DE PROVA DEFINIDO PELA NORMA MB-4 DA ABNT PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO. b) CORPO DE PROVA UTILIZADO NESTA TESE PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO

Foram utilizados corpos de prova no formato de filamentos para os ensaios de tração, dobramento e perfilometria. Para os ensaios de MEV, absorção de água, densidade e difratometria de raios-X foram utilizados *pellets*, assim como apresentado na Figura 31.

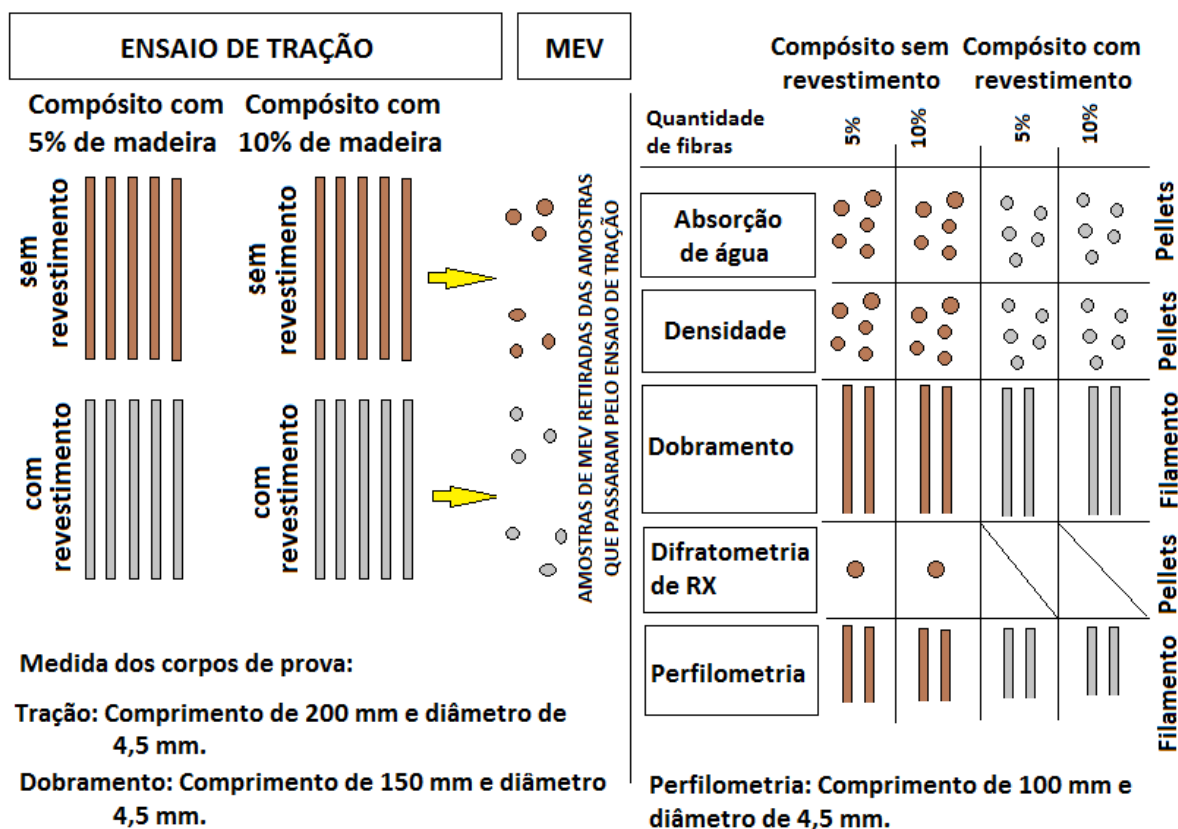


FIGURA 31: ESQUEMA DO USO DA QUANTIDADE E FORMA DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DA SEGUNDA ETAPA

5.1.4 Fabricação dos Filamentos na Terceira Etapa

O primeiro passo foi revestir as fibras de madeira de forma a garantir um melhor revestimento. Também foi utilizado nesta etapa o compatibilizante maleatado F5. Para revestir as fibras não foi necessário acrescentar polipropileno virgem, pois, como a quantidade de compatibilizante foi de 10% p/p no total e o de fibras foi de 5% p/p no total da mistura, ao misturar apenas as fibras com o compatibilizante ficou um equivalente de 33,33% p/p de fibras na mistura, assim

como pode ser verificado na Tabela 9. Até a concentração de 40% p/p de fibras a extrusora suporta bem o processamento.

TABELA 9: COMPOSIÇÃO DA MISTURA FIBRAS/ COMPATIBILIZANTE

Compatibilizante - PPMA	450	66,67%
Fibra de madeira	225	33,33%
TOTAL	675	100,00%

Esta terceira etapa visou a eliminação máxima de água para comparação com a etapa anterior na qual foi verificada a interferência da umidade no processo. Assim, além de utilizar as fibras secas em estufa, os filamentos de fibras revestidas não passaram pelo resfriamento do banho de água.

Após as fibras serem revestidas, e, após estarem frias, foram granuladas e separadas em duas porções iguais. Metade das fibras foi colocada em estufa com temperatura de 60°C e a outra metade em estufa com temperatura de 120°C.

As fibras revestidas ficaram durante todo o tempo em estufa até o processamento com a adição de polipropileno. Foi programado deixar cada parcela do material granulado por 24 h em estufa em cada uma das temperaturas.

A mistura foi realizada de forma manual, em um saco plástico. Durante o processamento a farinha de madeira tende a acumular-se nas paredes da extrusora, o que reflete em diferentes concentrações de fibra de madeira ao longo do filamento. Desta forma, quando se inicia a extrusão dos filamentos, primeiramente surge o compatibilizante e na sequência aparecem as grandes aglomerações de fibras de madeira. A Figura 32 apresenta os filamentos, formados pelas fibras de madeira revestidas com compatibilizante, após terem sido granulados e misturados.



FIGURA 32: FIBRAS REVESTIDAS E GRANULADAS

A programação nesta etapa foi para a produção de 4500 g de material compósito final, e, para fazer a união das fibras revestidas com o PP, a soma foi feita considerando a redução no peso dos materiais iniciais (fibras) devido à secagem. Assim, como apresentado na Tabela 10, a composição final do compósito foi de 450 g de compatibilizante, 225 g de fibra de madeira e 3825 g de polipropileno virgem.

TABELA 10: COMPOSIÇÃO INICIAL DA MISTURA PARA O COMPÓSITO DA TERCEIRA ETAPA

MATERIAL	Massa (g)	PERCENTAGEM (%)
Compatibilizante - PPMA	250	10
Fibra de madeira	500	5
Polipropileno - PP	4250	85
TOTAL	5000	100

As fibras revestidas, e secas em estufa à temperatura de 60°C ou 120°C, foram misturadas ao PP virgem em quantidade a somar 2500 g cada porção. Desta forma, para o compósito submetido à temperatura de 60°C, foi considerada a soma de 374 g mais a quantidade de 2123 g de PP virgem, totalizando os 2497 g de mistura. No caso da mistura submetida à estufa com temperatura de 120°C, foi calculada a quantidade de 2123 g de PP virgem com 364 g das fibras revestidas, totalizando 2487 g de mistura. A mistura das fibras revestidas com o polipropileno também apresentou dificuldade devido ao diferente tamanho e densidade do PP em comparação às fibras revestidas com PPMA (Figura 33).



FIGURA 33: MISTURA MANUAL DAS FIBRAS REVESTIDAS GRANULADAS COM O PP VIRGEM

Quando esta mistura foi colocada na extrusora o material se separou novamente, sendo primeiro extrudado o polipropileno, formando assim, filamentos iniciais sem fibra de madeira. Com o avanço do processamento os grânulos de fibras de madeira revestidas com PPMA vão sendo empurrados por *pellets* de PP e começa a aparecer a madeira. A Figura 34 mostra o início do processamento com a aparência apenas de PP (34a) e, após algum tempo, o início da extrusão de filamentos com fibras de madeira, que surge de forma concentrada (34b), demonstrando uma mistura não homogênea.

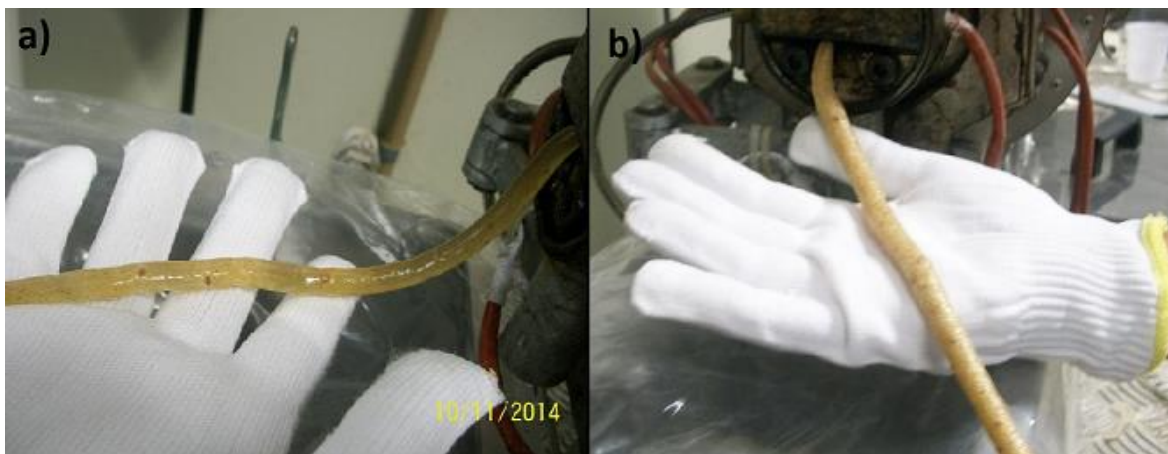


FIGURA 34: a) INÍCIO DA EXTRUSÃO DOS FILAMENTOS SEM A PRESENÇA DE FIBRA DE MADEIRA. b) FILAMENTO COM GRANDE CONCENTRAÇÃO DE FIBRAS DE MADEIRA

Estes filamentos também não passaram pela água, sendo resfriados apenas pelo contato com o ar. Mesmo nos filamentos que é possível ver que houve fusão do polipropileno com a madeira revestida (Figura 34b), é visualizado o acúmulo de madeira em alguns grânulos, quando o filamento é analisado após ser granulado (Figura 35). Foi necessário, desta forma, fazer o reprocessamento dos filamentos para obter-se uma mistura mais homogênea.



FIGURA 35: MATERIAL GRANULADO APÓS O PRIMEIRO PROCESSAMENTO COM PP VIRGEM DEMONSTRA DISTRIBUIÇÃO DESIGUAL DAS FIBRAS DE MADEIRA AO LONGO DO FILAMENTO

O material processado, após ser granulado, foi para a estufa novamente com as temperaturas antes estabelecidas, pelo mesmo período de tempo (24 h). Após isto o material foi reprocessado e apresentou uma aparência muito mais homogênea. Deste reprocessamento foram retirados os corpos de prova para ensaios de caracterização mecânica. O material que foi para a estufa a 120°C apresentou aspecto muito mais escurecido do que o material que permaneceu na estufa a 60°C, assim como é possível verificar na Figura 36. Este material reprocessado também não passou pela água. Após os corpos de prova estarem produzidos os mesmos foram para a estufa novamente, nas mesmas temperaturas estabelecidas para o processo como um todo.



FIGURA 36: DIFERENTE TONALIDADE ENTRE OS FILAMENTOS TRATADOS A 60°C E A 120°C

Todas as amostras, nas três fases de processamento desta terceira etapa, foram pesadas e a diferença entre a massa, antes e após cada etapa do material em estufa a 60°C e 120°C, pode ser verificada na Tabela 11.

TABELA 11: DIFERENÇA DE MASSA DO COMPÓSITO APÓS TRATAMENTO TÉRMICO

ETAPA	Temperatura – estufa (°C)	Tempo (h)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Diferença (%)
Fibras revestidas	60	24	377	374	0,80
Fibras revestidas	120	24	377	364	3,50
Compósito – após 1º Processamento	60	24	2497	2473	0,95
Compósito – após 1º Processamento	120	24	2487	2159	13,20
Compósito – após 2º Processamento	60	24	2452	2452	0
Compósito – após 2º Processamento	120°C	24H	2479	2436	1,73

As fibras revestidas que ficaram em estufa por 24 h, com temperatura de 60°C, apresentaram redução de 0,80% na sua massa. Diferentemente destas, as mesmas fibras revestidas, porém, que foram mantidas por igual tempo em estufa com temperatura a 120°C tiveram redução de 3,50%, se comparada à massa antes do aquecimento. Esta redução na massa do material compósito após aquecimento se manteve nas próximas etapas de processamento. As fibras

revestidas misturadas com o PP apresentaram diminuição na sua massa de 0,95% após ficarem em estufa com temperatura de 60°C e de 13,20% após 24 h em estufa à temperatura de 120°C. Este material foi novamente processado (2º processamento) e aquecido por mais 24 h em estufa com temperatura a 60°C, sem apresentar variação na sua massa, e em 120°C, com redução de 1,73 % na sua massa. Os corpos de prova para os ensaios tiveram o formato de filamentos para os ensaios de dobramento e perfilometria. Para os ensaios de MEV, absorção de água, densidade e difratometria de raios-X foram utilizados *pellets*, assim como apresentado na Figura 37.

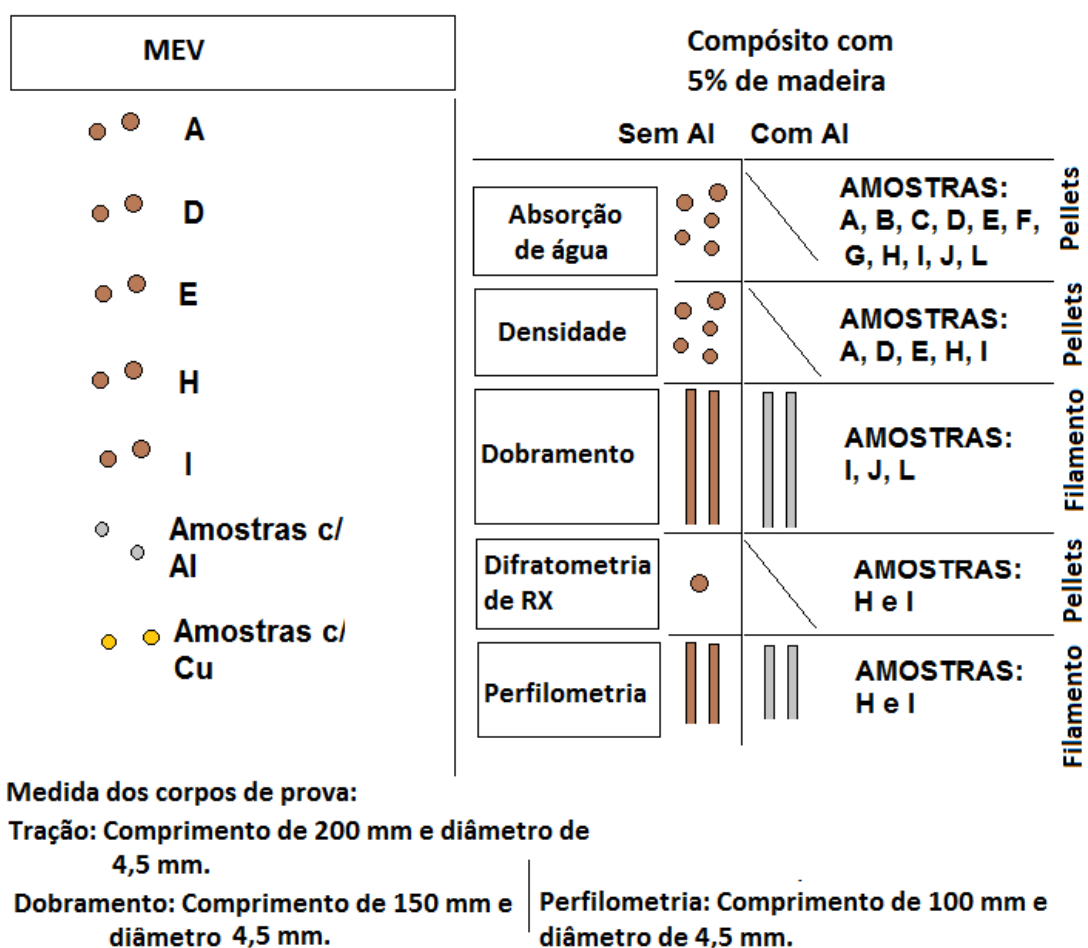


FIGURA 37: ESQUEMA DOS ENSAIOS REALIZADOS NA TERCEIRA ETAPA

Nesta etapa também foram desenvolvidas algumas peças, incluindo a utilização de moldes. Na Figura 38 é possível verificar a fabricação de um balde através do uso de filamentos viscosos. Como molde foi utilizado um balde plástico

(polipropileno), resíduo de consumo, e que não se deformou ao receber os filamentos ainda quentes. Iniciou-se o trabalho formando a base da peça pretendida, a qual foi moldada de forma manual (38a). Após alcançar o diâmetro do fundo do balde de plástico a base formada foi colocada sobre o balde e os filamentos começaram a envolver a lateral do mesmo, no sentido da borda (Figura 38b e 38c). Por ser constante a extrusão, a formação da peça exige agilidade, além de ser necessário dar a forma desejada ao filamento antes do mesmo esfriar e, conseqüentemente, enrijecer. Os filamentos na peça foram totalmente unidos, de forma a proporcionar maior resistência ao balde produzido. O uso de luvas de proteção é indispensável, pois o filamento, além de não passar por resfriamento e estar em estado viscoso e muito quente, precisa ser protegido de resíduos existentes nas mãos, como sujeiras e oleosidades. Outras peças foram formadas, sem o uso de moldes, como é o caso do apoio de panela apresentado na Figura 38d.



FIGURA 38: FABRICAÇÃO DE UM BALDE UTILIZANDO FILAMENTOS E MOLDE PLÁSTICO. a) MOLDAGEM MANUAL DA BASE DO BALDE. b) INÍCIO DA MOLDAGEM DA LATERAL DO BALDE. c) FINALIZAÇÃO DO BALDE FORMADO COM FILAMENTOS VISCOSOS. d) PRODUÇÃO DE APOIO PARA PANELA SEM USO DE MOLDE

5.2 PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA NOS CORPOS DE PROVA

5.2.1 Características Gerais

Foi aplicado um revestimento metálico através do processo de aspersão térmica, utilizando arame de alumínio, nas três etapas de análise e desenvolvimento de filamentos desta pesquisa. Estando preparados os filamentos, e armazenados em estufa à temperatura de 40°C, receberam a deposição de alumínio no Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais da Universidade Federal do Paraná. O grau de limpeza foi obtido por comparação com os padrões de qualidade de superfície da NACE RM 01 código 70.

O revestimento metálico de alumínio, utilizando o processo de aspersão térmica à chama, foi manual e a máquina utilizada para a deposição está apresentada na Figura 39a, e encontra-se no laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais da UFPR. Foi escolhido o processo de aspersão por chama por apresentar menor temperatura quando comparado com o processo de Arco elétrico, por exemplo, pois existia o temor da madeira não suportar o calor e entrar em combustão.

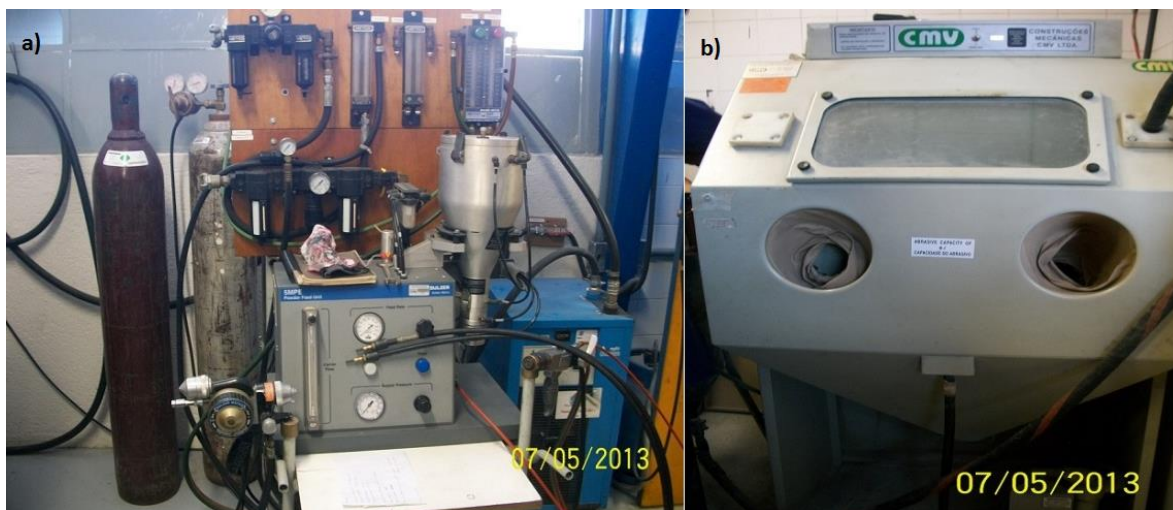


FIGURA 39: a) EQUIPAMENTO PARA ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA. b) CÂMARA PARA JATEAMENTO ABRASIVO

Não foi realizado o jateamento abrasivo das peças para deposição do alumínio, em nenhuma das etapas, tendo em vista que a mesma já apresentava substrato rugoso em função do uso da madeira no compósito. Porém, quando foi

aplicado cobre sobre o substrato, foi necessário jatear o filamento. A câmara utilizada para o jateamento abrasivo é mostrada na Figura 39b.

Foi utilizada a mesma pistola para jateamento de todos os filamentos de todas as etapas, a qual é mostrada na Figura 40. A distância da pistola em relação ao substrato foi de 30 cm.



FIGURA 40: PISTOLA USADA NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA

O processo de aspersão térmica seguiu os seguintes parâmetros:

- a. Processo a chama, com utilização de arame;
- b. Arame de alumínio com diâmetro de 3,2 mm;
- c. Velocidade de alimentação do arame de 40 cm/min;
- d. Pressão ar comprimido de 4,9 Kgf/cm²;
- e. Fluxo do ar comprimido de 40 FMR;
- f. Pressão do Acetileno de 15 Psi;
- g. Fluxo de Acetileno de 65 scfh;
- h. Pressão do Oxigênio de 35 Psi;
- i. Fluxo do Oxigênio de 40 scfh.

5.2.2 Aspersão Térmica na Primeira Etapa de Ensaio

Após os filamentos e peças estarem finalizadas, e com a intenção de avaliar o efeito da deposição de alumínio sobre os filamentos, foram escolhidas duas peças, como representantes de todo o ensaio inicial, para teste com aspersão térmica. Foi escolhida uma peça produzida com 20% p/p de madeira, e um filamento duplo produzido com 10% p/p de madeira.

Porém, por se tratar de peças vazadas e filamentos fez-se necessário avaliar a forma de aplicação do alumínio, pois o objetivo é uma deposição de forma homogênea e com redução de perda de material metálico. Desta forma, a técnica preliminar utilizada para aplicação da aspersão térmica nesta primeira etapa foi bastante simples, pois, a trama com 20% p/p de madeira em sua composição foi encaixada em uma argola fabricada em aço e este conjunto foi fixado em uma morsa, para facilitar a aplicação do revestimento. Também foram revestidos com alumínio dois filamentos duplos de compósito com 10% p/p de madeira, que foram fixos em uma estrutura metálica (Figuras 41a e 41b).

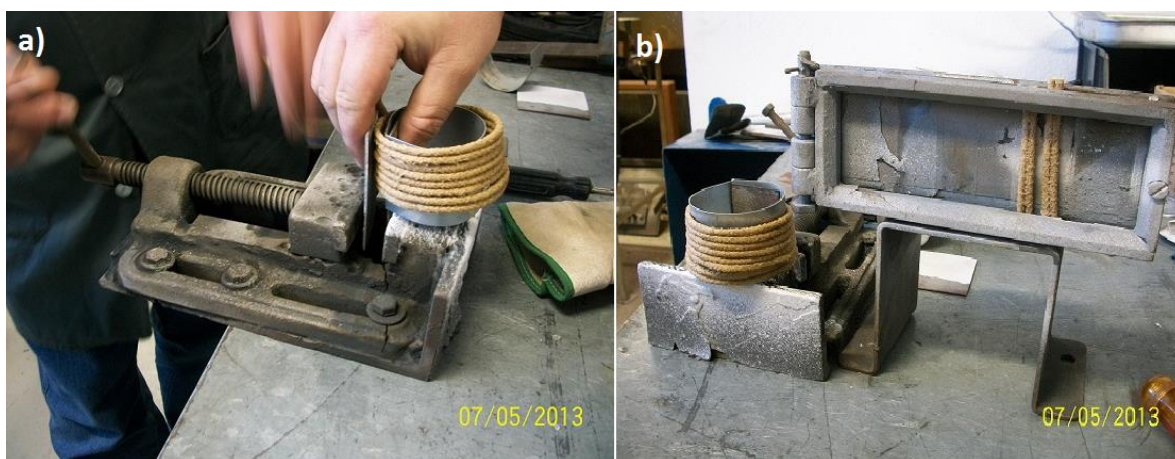


FIGURA 41: a) ARGORA FIXA EM UMA MORSA. b) ARGOLA E FILAMENTO PREPARADOS PARA ASPERSÃO TÉRMICA

A deposição foi dificultada em virtude de ser necessário rotacionar manualmente o material que recebia o revestimento, além de ser mais difícil garantir a homogeneidade do mesmo. As Figuras 42a e 42b mostram os

filamentos recebendo a deposição de alumínio e as Figuras 42c e 42d apresentam a aspersão térmica sobre o substrato da peça em forma de argola.

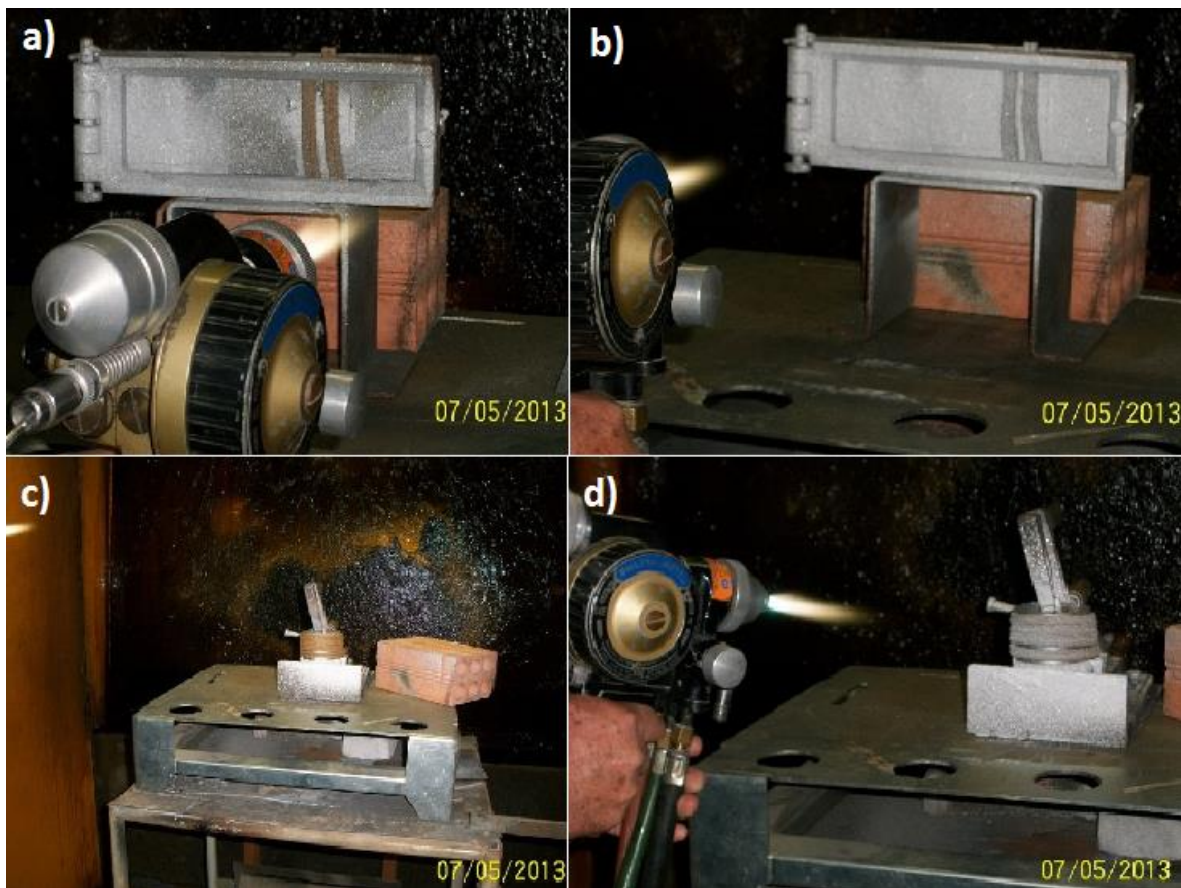


FIGURA 42: a) FILAMENTOS RECEBENDO REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO. b) FILAMENTOS REVESTIDOS. c) ARGOLA PREPARADA PARA RECEBER A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO. d) ARGOLA RECEBENDO DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO

5.2.3 Aspersão Térmica na Segunda Etapa de Ensaio

Os filamentos da segunda etapa (com 5 e 10% p/p de fibras de madeira) também receberam a deposição de alumínio. No intuito de facilitar a aplicação do revestimento, e aperfeiçoar a homogeneidade do mesmo, foi utilizado, nesta etapa, um sistema para a rotação dos filamentos durante o processo de aspersão térmica de forma a garantir que toda a amostra fosse revestida. Esse sistema consistiu do uso de um inversor e de um motor com redução, o que permitiu que o filamento girasse durante a aplicação, sendo a velocidade de rotação de uma volta completa por segundo. O filamento precisou ser preso na parte inferior por uma

arruela, para que o mesmo não se movimentasse com a pressão da deposição (Figuras 43 a 44).

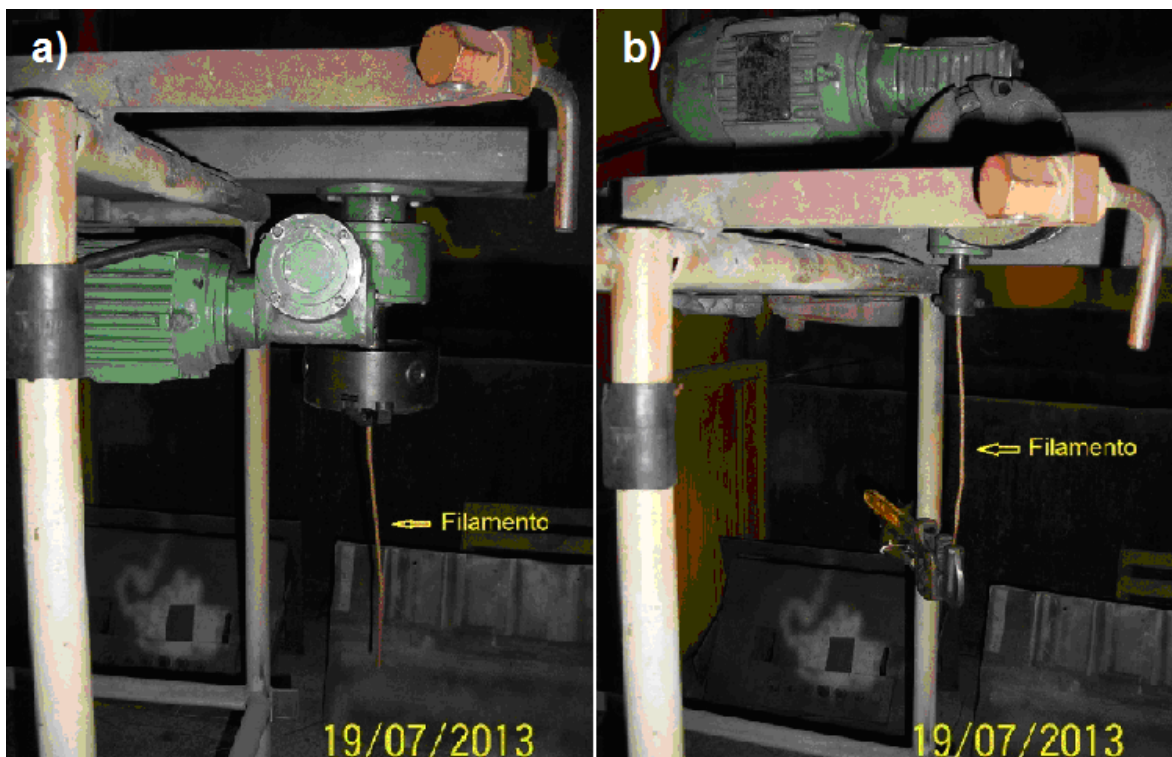


FIGURA 43: a) PREPARAÇÃO DO FILAMENTO PARA RECEBER A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO.
b) FILAMENTO PRESO NAS EXTREMIDADES PARA EVITAR MOVIMENTAÇÃO DURANTE A ASPERSÃO TÉRMICA



FIGURA 44: UTILIZAÇÃO DE ARRUELA PARA FIXAÇÃO DO FILAMENTO

Cada filamento (corpo de prova) recebeu três passes (repetições) de deposição, sendo que ocorreram algumas diferenças na espessura da camada de alumínio, em virtude de ser um trabalho manual, assim como pode ser verificado na Figura 45.

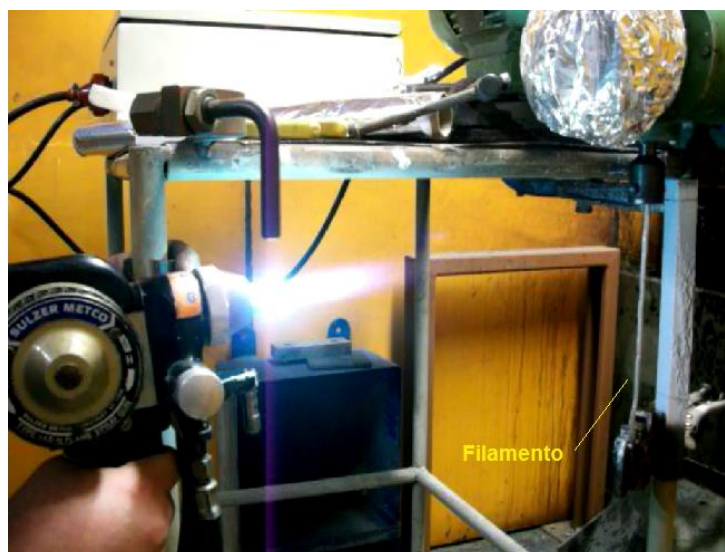


FIGURA 45: FILAMENTO RECEBENDO A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO DE FORMA MANUAL

5.2.4 Aspersão Térmica na Terceira Etapa de Ensaio

Finalmente, foi analisado o efeito da aspersão térmica sobre os filamentos preparados na terceira etapa desta pesquisa, que são filamentos com 5% p/p de fibras de madeira. Nesta terceira etapa o objetivo foi depositar, além de alumínio, também o cobre sobre o substrato do compósito e avaliar as características mecânicas e físicas deste compósito revestido, realizando a comparação no desempenho entre os materiais de revestimento e analisando a deposição em filamentos tratados à temperaturas de 60°C e 120°C (Figura 46).

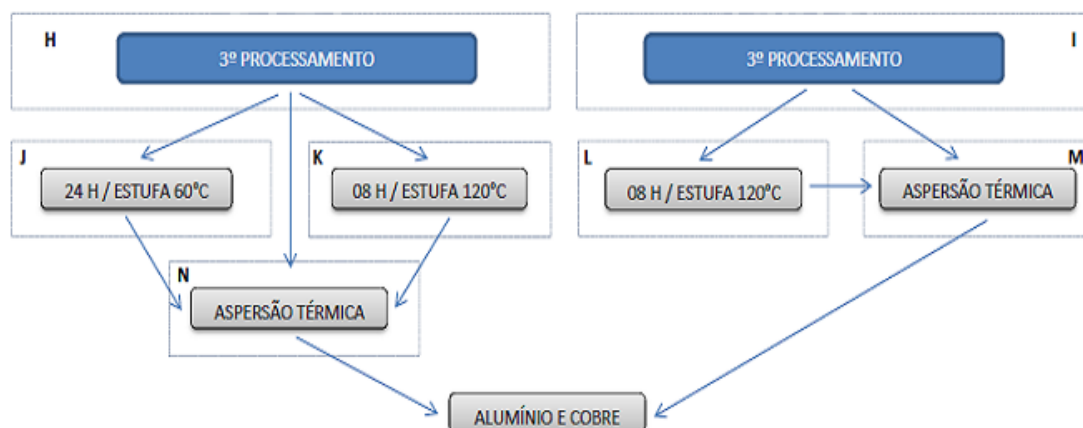


FIGURA 46: FASES DESENVOLVIDAS NA TERCEIRA ETAPA PARA A ASPERSÃO TÉRMICA, CONSIDERANDO A APLICAÇÃO DE ALUMÍNIO E COBRE EM COMPOSTOS SUBMETIDOS À TEMPERATURAS DE 60°C E 120°C

As amostras de filamentos revestidos, assim como apresentado na Tabela 12, são as amostras H – retiradas do terceiro processamento após tratamento anterior a 60°C, I – retiradas do terceiro processamento após tratamento anterior a 120°C, J – amostras que ficaram 24 h em estufa a 60°C após o terceiro processamento, K – amostras que ficaram 8 h em estufa a 120°C após terceiro processamento, e L – amostras que ficaram 8 h em estufa a 120°C após terceiro processamento do material tratado em 120°C.

TABELA 12: AMOSTRAS DE FILAMENTOS QUE RECEBERAM ALUMÍNIO

AMOSTRA	TRATAMENTO
H	Terceiro processamento com tratamento em temperatura de 60°C
I	Terceiro processamento com tratamento em temperatura de 120°C
J	24H de estufa em 60°C após terceiro processamento
k	08H de estufa em 120°C após terceiro processamento
L	8H de estufa em 120°C após terceiro processamento de material tratado em 120°C

Após os corpos de prova estarem finalizados, os mesmos foram mantidos em estufa a 40°C até o momento de receberem o revestimento através de aspersão térmica. Para facilitar a deposição sobre o filamento (corpo de prova), nesta terceira etapa, também foi necessário adaptar um sistema para a rotação dos filamentos durante o processo de aspersão térmica de forma a garantir que toda a amostra fosse revestida. Esta adaptação foi uma evolução do sistema utilizado para a aspersão dos filamentos na segunda etapa, pois, além do uso do motor com inversão, foi adaptado um apoio com regulagem para os filamentos, dispensando o uso da arruela e permitindo maior firmeza na peça durante a pressão ocasionada pela aspersão, além de permitir apoiar peças, como será apresentado nas figuras 49 e 50. Neste sistema apenas um filamento pode ser aspergido por vez (Figura 47), assim como o sistema utilizado na segunda etapa.



FIGURA 47: EQUIPAMENTO PARA APOIO DOS FILAMENTOS QUE RECEBERÃO REVESTIMENTO ATRAVÉS DE ASPERSÃO TÉRMICA

A aplicação do alumínio e do cobre também foi feita de forma manual, por este motivo a pistola foi mantida a uma distância similar, de 30 cm, durante todos os passes; a pistola esteve totalmente alinhada com o filamento no decorrer de todo o processo de deposição. Estas duas situações podem ser verificadas na Figura 48.



FIGURA 48: a) PISTOLA FICOU A UMA DISTÂNCIA DE 30cm DO FILAMENTO. b) A PISTOLA PERMANECEU ALINHADA COM O FILAMENTO DURANTE A APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO

O sistema adaptado para a deposição do alumínio e cobre sobre o substrato dos filamentos também foi utilizado para a deposição de alumínio em uma peça no formato de um balde (Figura 49).



FIGURA 49: PEÇA EM FORMATO DE BALDE FIXADA NO SISTEMA PREPARADO PARA APLICAÇÃO DE ALUMÍNIO E COBRE

Com a rotação do objeto a aspersão térmica foi facilitada (Figura 50).

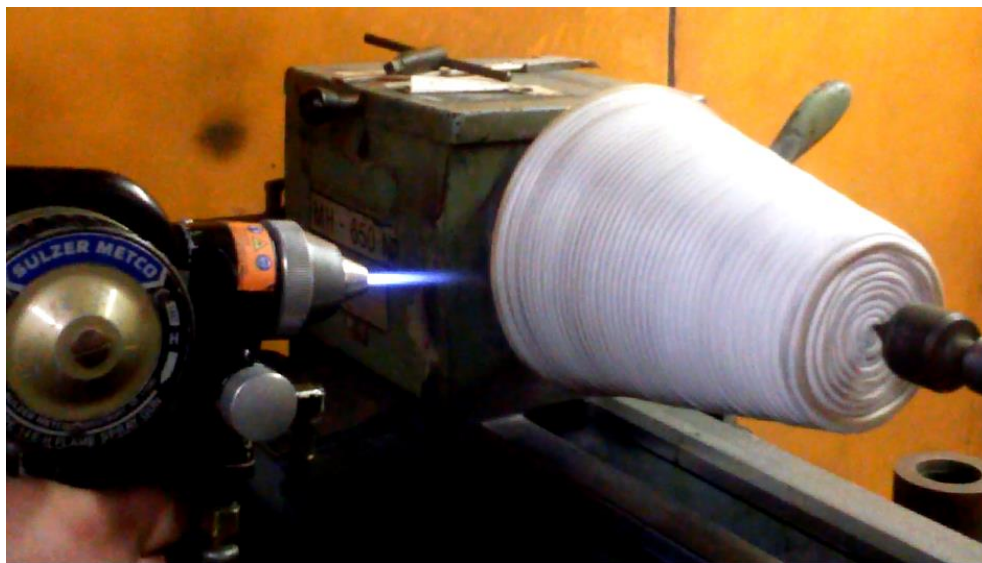


FIGURA 50: PEÇA EM FORMATO DE BALDE RECEBENDO A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO

6 RESULTADOS

6.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

6.1.1 Peças Formadas

Foram primeiramente confeccionados filamentos de polímero (PP) puro para avaliação da espessura e da maleabilidade dos mesmos, sendo produzidas algumas tramas, como é possível verificar na Figura 51. Porém, os filamentos fabricados apenas com polímeros virgens, embora sejam fáceis de serem arranjados na forma de tramas, quando estão em uma espessura de até 4 mm, não possuem rigidez, formando peças sem sustentação.



FIGURA 51: TRAMAS REALIZADAS COM FILAMENTOS DE POLÍMERO VIRGEM

Foram então preparados os filamentos de compósitos contendo 10 e 20% p/p de madeira, com a utilização de compósitos anteriormente fabricados e que estavam em formato de grânulos. Foi possível formar peças como apoios (Figura 52a e 53a), uma pulseira (Figura 52b), e um recipiente com fundo tramado e laterais com filamentos soltos para posterior fixação, servindo como luminária, ou móvel (Figura 53b). As peças apresentadas na figura 52a e 52b foram confeccionadas com 20% p/p de madeira Pinus, 70% p/p de polipropileno virgem e 10% p/p de compatibilizante, sendo moldadas com os filamentos viscosos oriundos da extrusora.

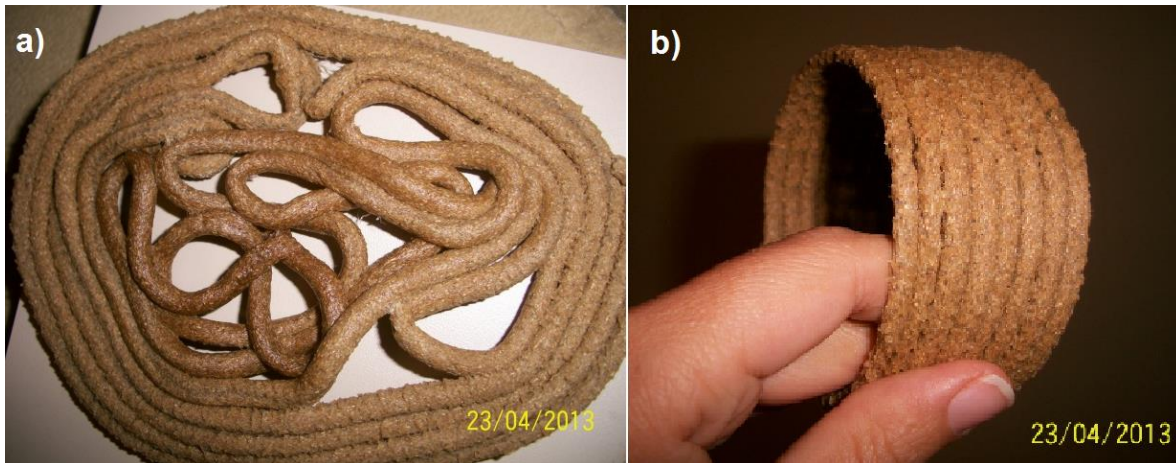


FIGURA 52: a) PEÇA CONFECCIONADA COM 20% p/p DE MADEIRA. b) PULSEIRA CONFECCIONADA COM 20% p/p DE MADEIRA

As peças apresentadas na Figura 53a e 53b foram confeccionadas com uma média de 10% p/p de madeira Pinus, 80% p/p de polipropileno virgem e 10% p/p de compatibilizante. Comparando-se estas peças com as peças produzidas com 20% p/p de madeira (Figura 52a e 52b) verificou-se que o uso de menor quantidade de serragem resulta em compósito com superfícies mais lisas.

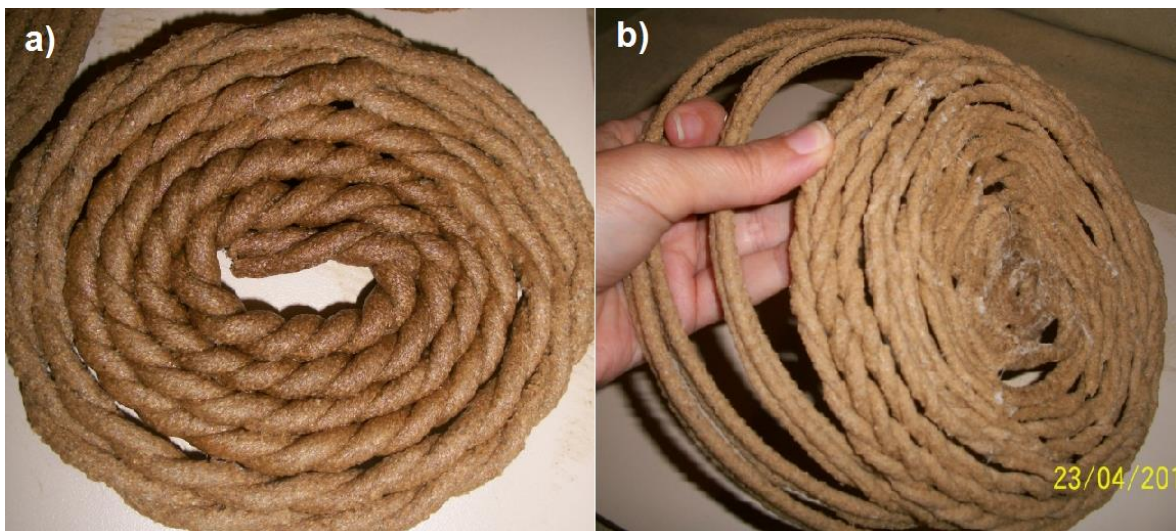


FIGURA 53: a) APOIO CONFECCIONADO COM 10% p/p DE MADEIRA. b) PEÇA FORMADA COM 10% p/p DE MADEIRA

6.1.2 Deposição de Alumínio Através de Aspersão Térmica

O experimento de aspersão térmica iniciou-se com a deposição do alumínio sobre os filamentos com 10% p/p de madeira e o resultado foi satisfatório. A

temperatura inicial de superfície durante o processo de aspersão térmica foi de 120°C, sendo reduzida para 97°C com o distanciamento da pistola.

Como estes filamentos apresentaram boa resistência ao processo, não indicando degradação da madeira, prosseguiu-se com o ensaio em uma peça com 20% p/p de madeira (pulseira apresentada na Figura 52b). O procedimento foi o mesmo utilizado para os filamentos com 10% p/p de madeira e o resultado foi similar, ou seja, o material também não apresentou, aparentemente, aspecto de degradação da madeira ou do polímero, e, embora contivesse o dobro de fibras, não foi identificada combustão parcial das mesmas. A argola e os filamentos, após a deposição do alumínio, podem ser visualizados na Figura 54a. Após esta análise, foi depositado alumínio sobre outra peça, também com 10% p/p de fibras de madeira e a deposição apresentou adesão, aparentemente, satisfatória (Figura 54b).

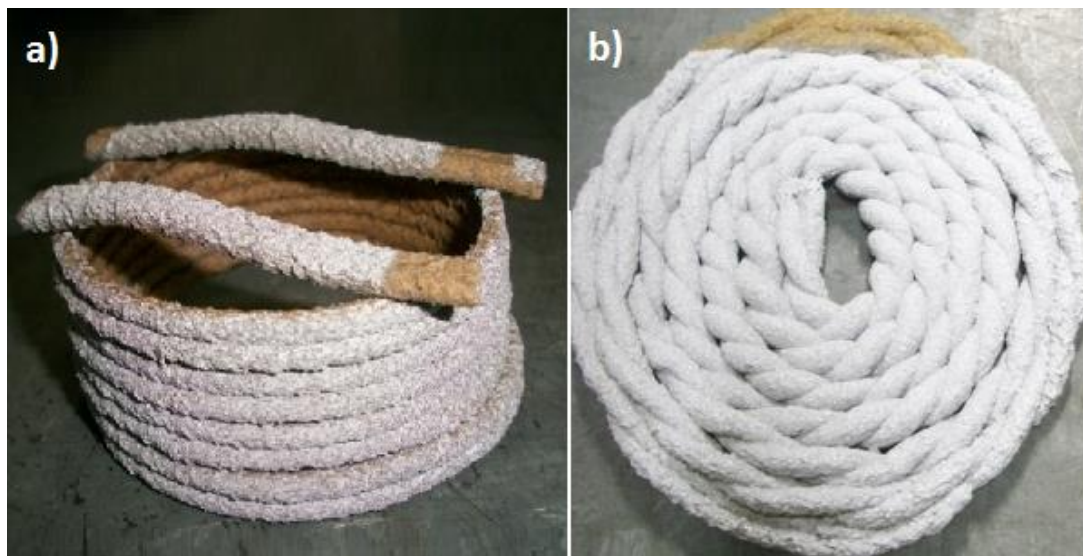


FIGURA 54: a) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA E ARGOLA COM 20% p/p DE MADEIRA APÓS DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO. b) PEÇA COM 10% p/p DE MADEIRA APÓS A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO

6.1.3 Ensaio de Dobramento

Foram realizados ensaios de dobramento de filamentos duplos sem e com revestimento de alumínio, nesta primeira etapa. Os filamentos ensaiados foram os fabricados com 10% p/p de fibra de madeira e foram avaliados em três momentos, sendo no início do ensaio, no momento intermediário do ensaio e na fratura dos

filamentos. A comparação entre os filamentos com e sem revestimento do substrato iniciou-se no primeiro segundo e pode ser verificado através da Figura 55a e 55b.

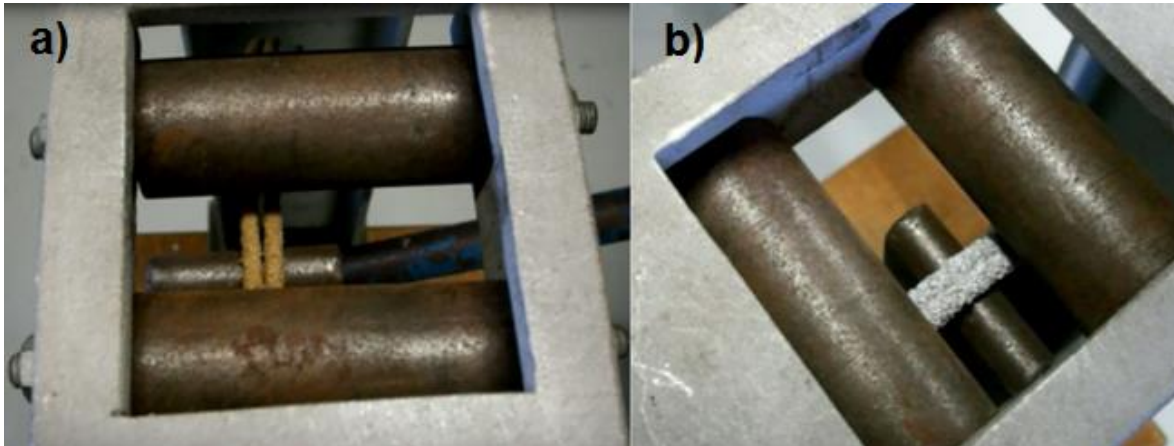


FIGURA 55: a) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA NO INÍCIO DO ENSAIO DE DOBRAMENTO. b) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA REVESTIDO COM ALUMÍNIO NO INÍCIO DO ENSAIO DE DOBRAMENTO

Após 11 s de dobramento (momento intermediário) o filamento sem revestimento indicou o início da fratura e o compósito com revestimento de alumínio não apresentava deformação aparente (Figura 56a e 56b).

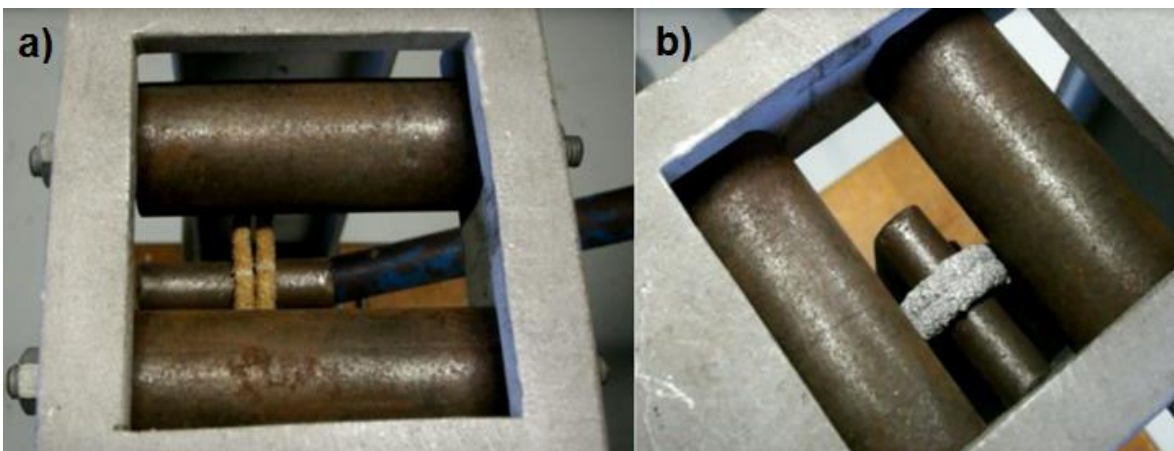


FIGURA 56: a) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA AOS 11 s DO ENSAIO DE DOBRAMENTO, JÁ APRESENTANDO SINAIS DE ROMPIMENTO. b) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA COM REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO, AOS 11 s DE ENSAIO, SEM INDICAR SINAL DE FRATURA

Aos 25 s de ensaio, enquanto o filamento revestido com alumínio apresentava um bom dobramento, o filamento sem revestimento rompeu-se (Figura 57a). O filamento com revestimento de alumínio rompeu apenas aos 40 s,

porém, não no centro do dobramento, e sim na lateral, o que indica que ocorreu fratura em um ponto frágil do filamento (Figura 57b).

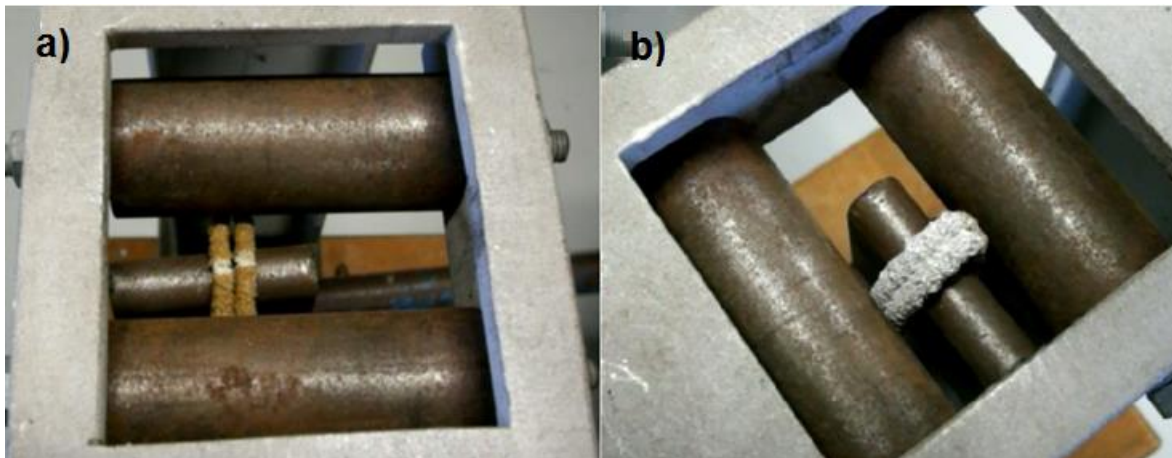


FIGURA 57: a) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA NO MOMENTO DA FRATURA – 25 s.
b) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA, REVESTIDOS COM ALUMÍNIO, NO MOMENTO DO ROMPIMENTO – 40 s

6.2 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

6.2.1 Peças Formadas

A segunda etapa consistiu na fabricação apenas de filamentos com diferentes percentagens de fibra de madeira para análise e definição da melhor quantidade de fibra a ser aplicada nos compósitos da terceira etapa. Nesta etapa foram produzidos vários filamentos, com diâmetro aproximado de 4 mm. Os corpos de prova podem ser visualizados na Figura 58.



FIGURA 58: FILAMENTOS PARA CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS NA SEGUNDA ETAPA DE PROCESSAMENTO

6.2.2 Aspersão Térmica

A maior preocupação nesta etapa de testes, assim como existiu no primeiro ensaio experimental, foi com a temperatura no momento da deposição sobre o substrato polimérico. A mesma faixa de temperatura na superfície das amostras foi mantida durante todo o processo sendo a maior temperatura registrada de 75°C, o que fica bem abaixo da temperatura de fusão do polipropileno e da degradação da madeira. A temperatura registrada durante a aspersão térmica, nesta segunda etapa, foi inferior à registrada no primeiro ensaio experimental devido à menor área de substrato e ao isolamento do corpo de prova, ao mantê-lo sem contato com peças (suporte) metálicas.

A espessura inicial dos filamentos foi de 4 mm e a média após a deposição foi de 4,27 mm, sendo que o filamento com maior espessura registrada foi de 4,40 mm e o com menor camada de deposição apresentou 4,17 mm. A Figura 59 apresenta um filamento com revestimento em alumínio ao lado de um pedaço de arame de alumínio utilizado para a deposição. É possível verificar que o filamento não fica retilíneo após a aspersão, mesmo que antes apresentasse esta característica. A temperatura das gotículas que chegam ao substrato aquecem o filamento, e a pressão da deposição favorece o amolecido e a deformação do mesmo. No entanto, esse fato não representa nenhuma limitação visto que as peças são formadas por vários filamentos, que, juntos, não se deformam durante o processo de revestimento através do processo de aspersão térmica.



FIGURA 59: COMPARAÇÃO ENTRE FILAMENTO REVESTIDO COM ALUMÍNIO E ARAME DE ALUMÍNIO UTILIZADO NA ASPERSÃO TÉRMICA

Estes filamentos foram enviados ao LACTEC para ensaio de tração e MEV, e o ensaio de dobramento foi realizado no Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais da Universidade Federal do Paraná. Também foi realizado o ensaio para análise da rugosidade da camada de alumínio depositada sobre o substrato, através de perfilometria. Não foi utilizado rugosímetro de contato em razão do formato circular dos filamentos.

6.2.3 Ensaio de Dobramento

Foram realizados ensaios de dobramento nos corpos de prova do compósito contendo 5% p/p de madeira e nos corpos de prova do compósito contendo 10% p/p de madeira. Todos os filamentos desta etapa foram resfriados em água após o processamento.

O compósito contendo 5% p/p de madeira quebrou em um tempo médio de 16 s após o início do ensaio. Os corpos de prova contendo 10% p/p de madeira romperam com 11 s após o início do ensaio. Desta forma, a amostra com maior concentração de madeira apresentou resistência ao dobramento inferior à amostra com 5% p/p de madeira, assim como é possível verificar na figura 60a e 60b, em que cada amostra estava a 1 s de romper. É possível visualizar o filamento contendo 5% p/p de madeira com um ângulo de dobramento maior que o filamento contendo 10% p/p de madeira.

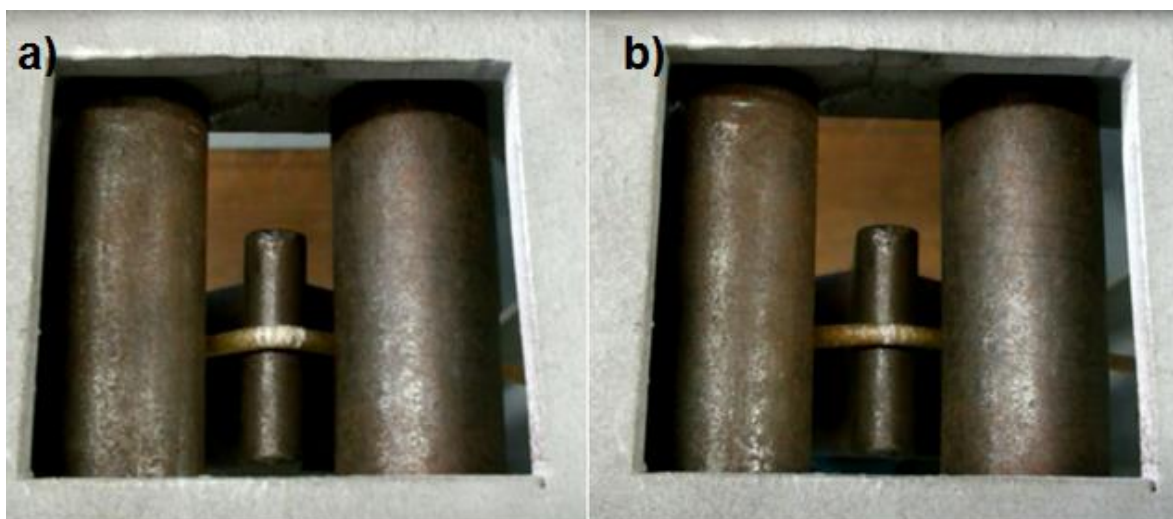


FIGURA 60: a) FILAMENTOS COM 5% p/p DE MADEIRA 1s ANTES DO ROMPIMENTO. b) FILAMENTOS COM 10% p/p DE MADEIRA 1 s ANTES DO ROMPIMENTO

Os mesmos filamentos depois de acondicionados em estufa para retirada de água, em temperatura de 50°C, apresentaram resultados superiores a estes primeiros resultados alcançados. Os filamentos contendo 5% p/p de madeira em sua composição mais que dobraram o tempo de resistência ao dobramento (40 s) e apresentaram curvatura bem superior ao filamento que não foi submetido ao aquecimento. Os filamentos contendo 10% p/p de madeira em sua composição, também apresentaram maior resistência (22 s), porém, continuaram a ter uma quebra frágil, ou seja, com pouca flexibilidade. Isto fica nítido na parte branca ilustrada em cada filamento apresentado na Figura 61a e 61b, quando faltava apenas 1 s para o rompimento de ambos.

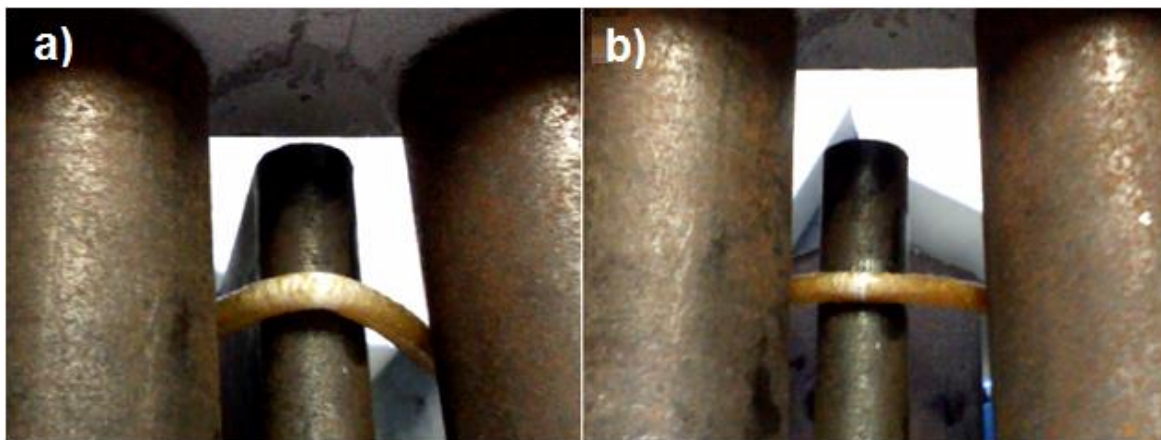


FIGURA 61: a) FILAMENTOS COM 5% p/p DE MADEIRA APÓS AQUECIMENTO EM ESTUFA A 50°C. b) FILAMENTOS COM 10% p/p DE MADEIRA DEPOIS DE ACONDICIONADOS EM ESTUFA A 50°C

O ensaio dos filamentos revestidos com alumínio também foi realizado. O resultado inicial do dobramento do filamento contendo 5% p/p de madeira revestido com alumínio foi de dobramento total, sem apresentar trincas visíveis no revestimento e sem rompimento do filamento, assim como pode ser visto na Figura 62a. Este filamento pode ser visto, após passar pelo ensaio de dobramento, na figura 62b, juntamente com os corpos de prova dos filamentos sem revestimento que passaram pelo mesmo ensaio e romperam.

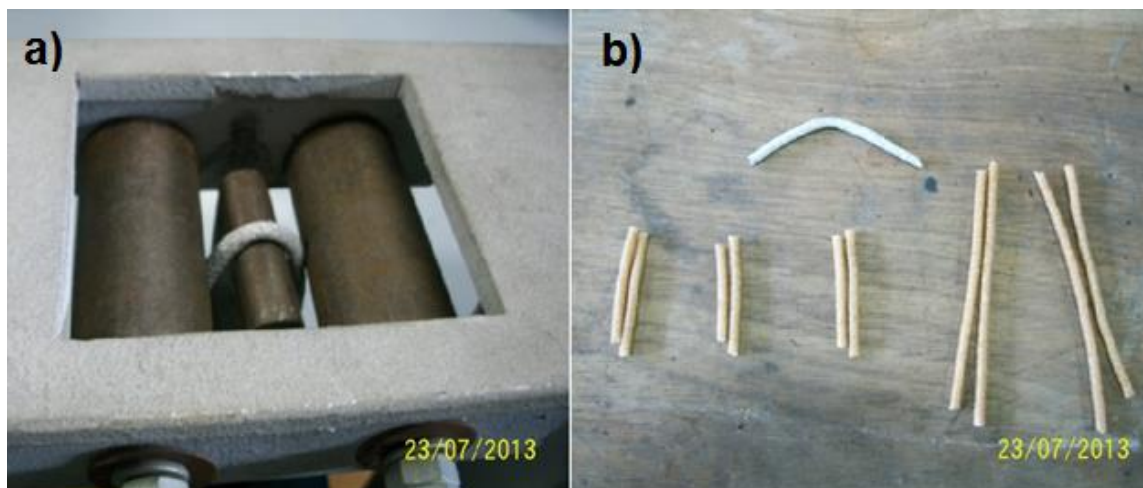


FIGURA 62: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA REVESTIDO EM ALUMÍNIO E COM DOBRAMENTO TOTAL. b) CORPOS DE PROVA ANALISADOS NO ENSAIO DE DOBRAMENTO

O melhor de todos os resultados foi o alcançado pelo filamento que recebeu o revestimento em alumínio através da aspersão térmica. O calor do processo de aspersão térmica provavelmente proporcionou maior mobilidade molecular do compósito na forma de filamento, alterando a sua mistura e promovendo um reforço extra ao material através do alumínio.

Desta forma, foram levantadas duas situações para que o compósito apresentasse uma maior resistência, sendo elas: a resistência aumenta devido à presença da camada de alumínio que é depositada sobre o substrato do corpo de prova, ou, então, o calor ao qual o material foi submetido durante a aspersão térmica, ou durante o tempo em estufa, é que ocasionou uma alteração na estrutura do compósito, o tornando mais homogêneo e, conseqüentemente, mais resistente. Pensando nesta segunda opção, foram colocados dois corpos de prova, sem revestimento de superfície, um de cada concentração de madeira (5% e 10% p/p), na estufa, em uma temperatura de 120° por um tempo de 20 min.

Após o tempo previsto as amostras foram retiradas da estufa, sendo resfriadas naturalmente, e, na sequência, foram testadas através do ensaio de dobramento. Estes filamentos dobraram sem rompimento, apenas com marcas de tensão no local do dobramento (parte branca). As duas amostras ensaiadas podem ser observadas na Figura 63a e 63b.

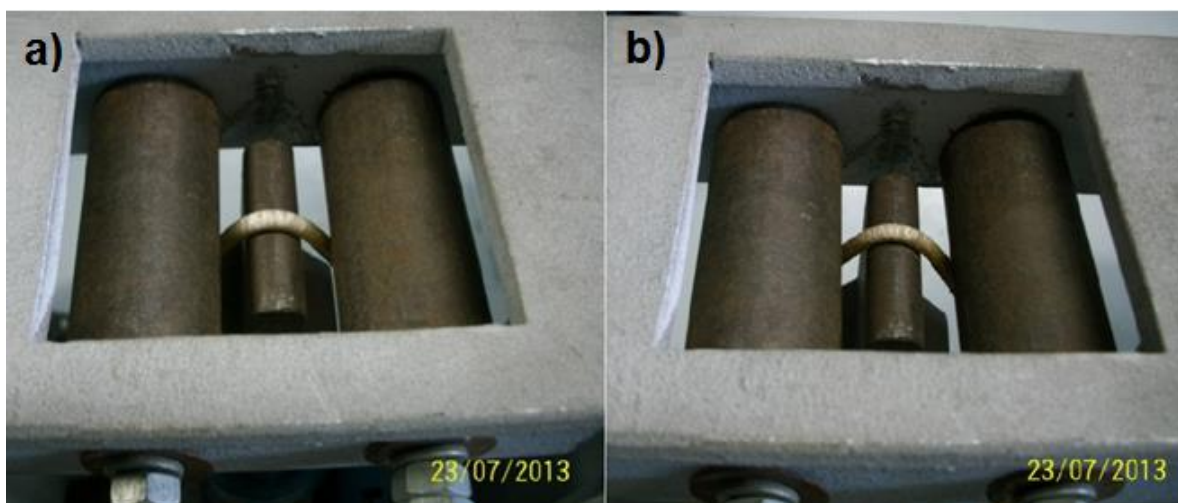


FIGURA 63: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA APÓS AQUECIMENTO POR 20 min EM ESTUFA A 120°C. b) FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA APÓS 20 min EM ESTUFA A 120°C

Os corpos de prova da Figura 63, depois de ensaiados, podem ser visualizados na Figura 64.



FIGURA 64: CORPOS DE PROVA ENSAIADOS E COM DOBRAMENTO TOTAL

6.2.4 Ensaio de Densidade

O ensaio de densidade para os filamentos da segunda etapa tiveram como resultado o que já era esperado, ou seja, que a densidade do compósito com maior teor de madeira é inferior a do compósito com menor percentagem de serragem, já que a densidade da serragem é inferior à densidade do PP. Ambos os ensaios demonstraram que o material produzido ficou com densidade muito próxima da densidade do polipropileno, que possui densidade de 0,903 g/cm³,

sendo que o compósito com 5% p/p de madeira apresentou densidade de 0,903 g/cm³ e o compósito com 10% p/p de madeira apresentou densidade de 0,881 g/cm³. A serragem de madeira de Pinus possui uma densidade de 0,374 g/cm³, mas atendendo a norma D792-00 que considera a compressão das fibras durante o processo de extrusão, nesta pesquisa será utilizada densidade para a serragem de 1,3 g/cm³.

A Tabela 13 apresenta a densidade experimental e teórica dos materiais fabricados, para ser possível avaliar o teor de serragem efetivamente incorporado aos compósitos. A densidade da amostra de compatibilizante F5, aplicado na produção do compósito desta etapa, é de 0,82 g/cm³ (SANTOS, 2011).

TABELA 13: DENSIDADE EXPERIMENTAL E TEÓRICA DO COMPÓSITO PRODUZIDO

Material	Média da densidade experimental (g/cm³)	Média da densidade teórica (g/cm³)
Compósito 5% de madeira	0,903	0,905
Compósito 10% de madeira	0,881	0,910

Comparando-se as densidades experimentais e teóricas, observa-se que os valores de densidade experimental estão próximos dos valores teóricos calculados para os compósitos com 5% p/p de madeira. Esse material, portanto, demonstrou apresentar baixa quantidade de poros, uma vez que uma grande quantidade de poros afetaria a densidade dos materiais, o que resultaria em valores inferiores. Além disto, após a ruptura dos corpos de prova no ensaio de tração não foram observados poros ou vazios, quando visualizados através do MEV. O mesmo resultado não foi tão satisfatório para o compósito com 10% p/p de madeira, pois a densidade teórica ficou com valores superiores aos da densidade experimental, o que confirma a presença de poros, os quais foram visualizados através do MEV na superfície de ruptura dos corpos de prova do ensaio de tração. A presença de vazios afeta negativamente a resistência do material, como também afeta os resultados dos ensaios mecânicos dos materiais, ao gerar dados incorretos.

Outro ponto a ser considerado é que quanto maior a concentração de serragem no compósito, mais leve é o material. Por outro lado, a adição de serragem torna o compósito mais rígido, o que pode dificultar a confecção das peças através do uso dos filamentos viscosos saídos da extrusora.

Como os compósitos com maior quantidade de madeira apresentaram valor de densidade inferior àqueles obtidos pelo cálculo teórico, o volume de poros deste material foi determinado através da equação 05.

Equação 05:

$$V_v = 1 - \rho_c \left[\left(\frac{W_s}{\rho_s} \right) + \left(\frac{W_{PP}}{\rho_{PP}} \right) + \left(\frac{W_{PPMA}}{\rho_{PPMA}} \right) \right]$$

Onde:

V_v = volume de vazio no compósito.

ρ_c = densidade experimental do compósito

W_s = fração em peso de serragem

ρ_s = densidade da serragem no compósito

W_{PP} = fração em peso de polipropileno

ρ_{PP} = densidade do polipropileno

W_{PPMA} = fração em peso do PPMA

ρ_{PPMA} = densidade do PPMA

A média do volume de vazio nos três corpos de prova com 10% p/p de madeira analisados nos ensaios de densidade foi igual a:

$V_v = 0,1290 \text{ g/cm}^3$

6.2.5 Ensaio de Absorção de Água

Na análise de absorção de água pelos filamentos, foram avaliados filamentos granulados (*pellets*), sem revestimento, com quantidades de 5 e 10%

p/p de fibra. O material primeiramente permaneceu em estufa a 50°C para remoção da umidade obtida em contato com o ambiente. Assim a massa inicial foi medida após os filamentos terem sido retirados da estufa. Na sequência, o material foi deixado em água destilada, em temperatura ambiente, por 24 h. Após isto os corpos de prova foram retirados e pesados novamente, após ser retirado o excesso de água com um papel absorvente.

Assim como é possível verificar nos dados da Tabela 14, os filamentos com 10% p/p de fibra absorveram aproximadamente o dobro da quantidade de água em relação aos filamentos contendo 5% p/p de fibras.

TABELA 14: ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS FILAMENTOS DA SEGUNDA ETAPA

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa após 24 h	Absorção de água (%)
5% p/p de fibras	0,142	0,147	3,52
10% p/p de fibras	0,109	0,117	7,34

6.2.6 Ensaio de Tração

6.2.6.1 Tensão máxima e de ruptura

Foi verificado através do ensaio de tração dos filamentos da segunda etapa (com 5 e 10% p/p) que o compósito PP/madeira, pelo seu comportamento tensão-deformação, é um material altamente sensível à deformação. A fratura ocorreu enquanto ocorria a deformação elástica, o que caracteriza um polímero frágil. A deformação plástica foi muito pequena.

Outro ponto analisado nestes ensaios de tração foi que as tensões máximas dos materiais analisados diminuíram com o aumento de concentração de fibra de madeira, pois a média de tensão máxima para os corpos de prova com 5% p/p de madeira foi de 39,59 MPa e para os corpos de prova do compósito com 10% p/p de madeira foi de 35,63 MPa. Este resultado sugere que como não houve reforço da matriz com o acréscimo de serragem, a adesão fibra/matriz foi insuficiente provavelmente devido à ineficiência da mistura plástico/madeira. Comparando com os filamentos que foram revestidos com alumínio através do processo de aspersão térmica, foi possível verificar uma diferença negativa na

resistência do material, pois a média para a tensão máxima foi de 34,38 MPa para os filamentos com 5% p/p de madeira e de 29,98 MPa para os filamentos com 10% de madeira. Desta forma, ambos os filamentos (com 5 e 10% p/p de madeira) apresentaram diminuição na resistência se comparados com os mesmos filamentos sem o revestimento de alumínio.

Para análise dos gráficos de tensão na carga máxima devem ser considerados os seguintes dados:

Compósito A: 5% p/p de madeira e 95% p/p de polipropileno;

Compósito B: 10% p/p de madeira e 90% p/p de polipropileno;

Compósito C: 5% p/p de madeira e 90% p/p de polipropileno com revestimento em alumínio;

Compósito D: 10% p/p de madeira e 90% p/p de polipropileno com revestimento em alumínio.

No Gráfico 2 é possível verificar a tensão máxima suportada por cada corpo de prova.

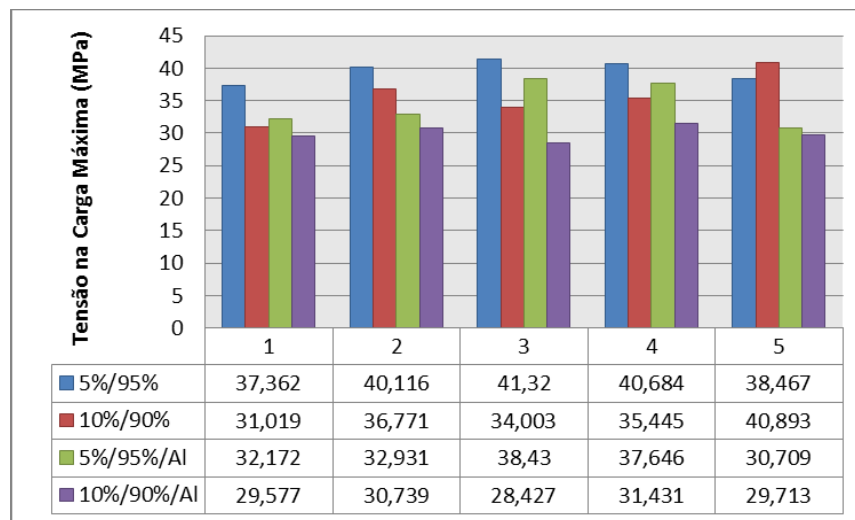


GRÁFICO 2: TENSÃO NA CARGA MÁXIMA

No Gráfico 3 é possível comparar de forma mais fácil a linha de tensão máxima suportada por cada amostra.

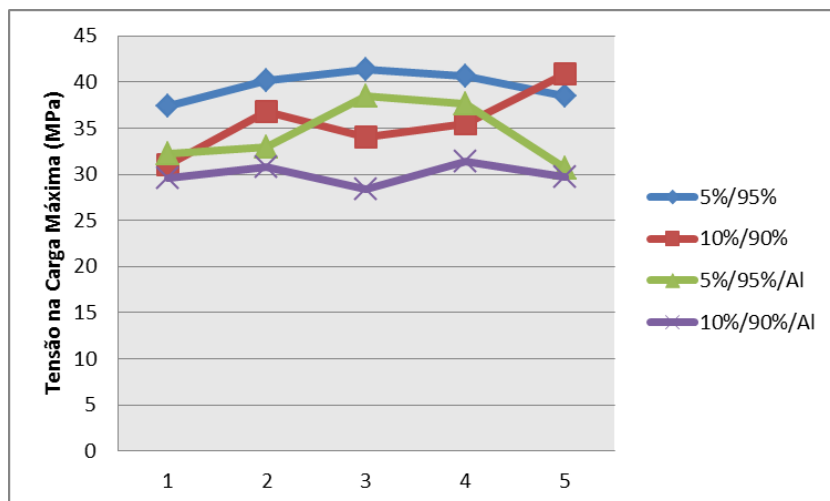


GRÁFICO 3: TENSÃO NA CARGA MÁXIMA REPRESENTADO NA FORMA DE LINHA

O resultado se repete ao serem comparados os valores de tensão máxima com os valores de tensão na ruptura dos gráficos, pois, observa-se que os filamentos que receberam o revestimento em alumínio também apresentaram uma queda perceptível de tensão até o ponto de ruptura. O fato da maior percentagem de madeira reduzir a resistência do filamento pode estar relacionado com a má dispersão da madeira ao longo da matriz. Se houvesse uma boa adesão fibra matriz, o aumento na concentração de madeira poderia proporcionar um aumento na resistência, uma vez que a ideia de utilizar madeira seria de servir como reforço. O resultado de tensão na ruptura, com os valores alcançados por cada corpo de prova pode ser visto no Gráfico 4.

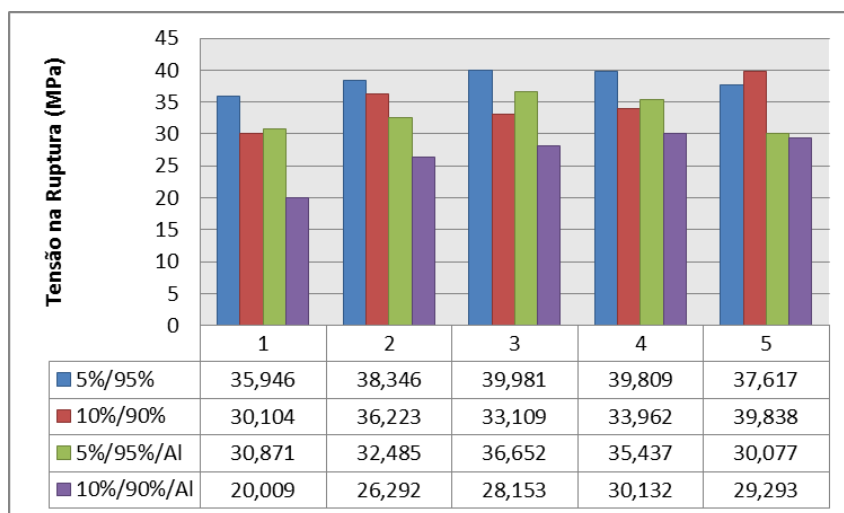


GRÁFICO 4: TENSÃO DE TRAÇÃO NA RUPTURA

Também é possível comparar de forma mais fácil a linha de tensão máxima suportada por cada amostra no Gráfico 5.

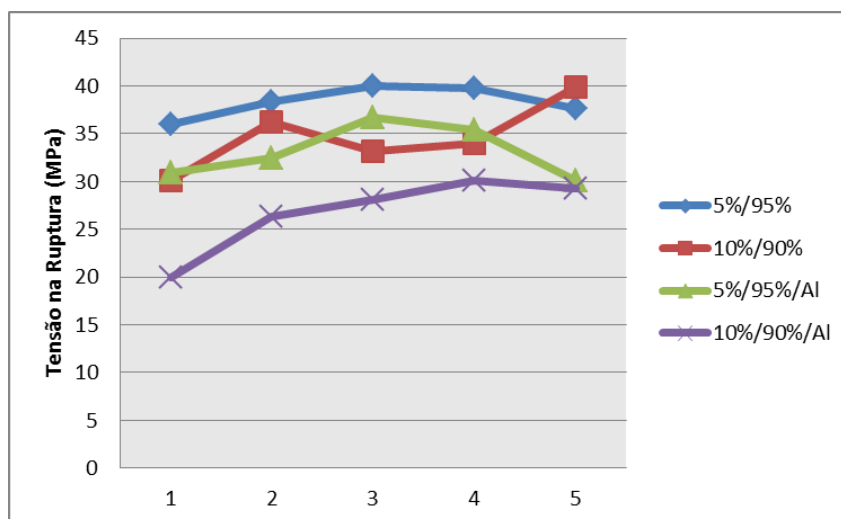


GRÁFICO 5: TENSÃO DE TRAÇÃO NA RUPTURA REPRESENTADO NA FORMA DE LINHA

Os resultados de tensão na carga máxima foram superiores ao resultado de tensão na ruptura e a comparação dos valores pode ser verificada no Gráfico 6.

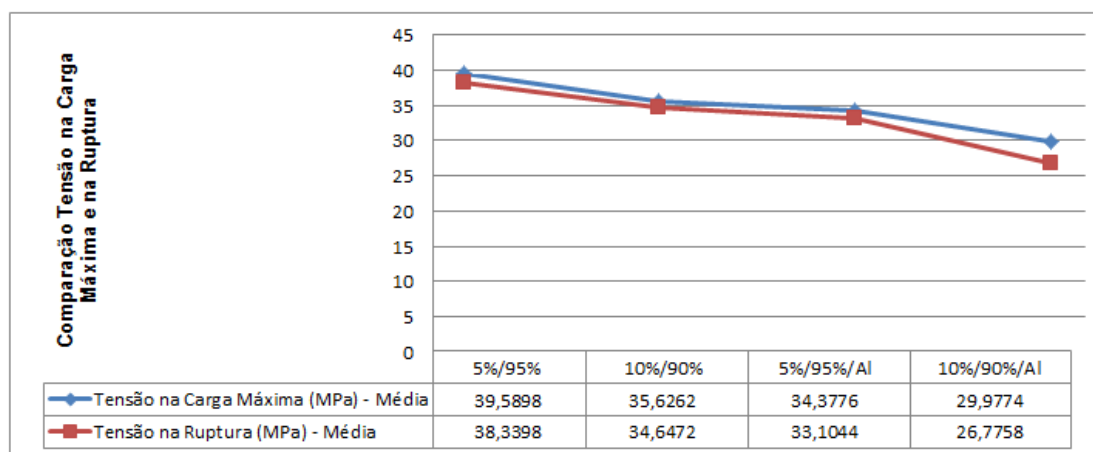


GRÁFICO 6: COMPARAÇÃO ENTRE TENSÃO NA CARGA MÁXIMA E TENSÃO NA RUPTURA

Os desvios padrão também devem ser considerados, os quais podem ser verificados na Tabela 15, e a equação 6 foi utilizada para alcançar estes resultados.

Equação 6:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

TABELA 15: DESVIO PADRÃO PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO

	TENSÃO NA CARGA MÁXIMA (MPa)	TENSÃO NA RUPTURA (MPa)
Compósito A - com 5% de madeira	1,63	1,66
Compósito B - com 10% de madeira	3,63	3,63
Compósito C - com 5% de madeira e alumínio	3,44	2,85
Compósito D - com 10% de madeira e alumínio	1,15	4,04

6.2.6.2 Módulo de Young

O Gráfico 7 apresenta os resultados do módulo de elasticidade dos quatro tipos de filamentos produzidos, sendo de duas concentrações diferentes de madeira (5 e 10% p/p) e sem revestimento de alumínio e com a deposição deste sobre a superfície dos filamentos.

Para análise dos gráficos de módulo de Young devem ser considerados os seguintes dados:

Compósito A: 5% p/p de madeira e 95% p/p de polipropileno;

Compósito B: 10% p/p de madeira e 90% p/p de polipropileno;

Compósito C: 5% p/p de madeira e 90% p/p de polipropileno com revestimento em alumínio;

Compósito D: 10% p/p de madeira e 90% p/p de polipropileno com revestimento em alumínio.

O resultado para módulo Young, com os valores alcançados por cada corpo de prova, pode ser visto no Gráfico 7.

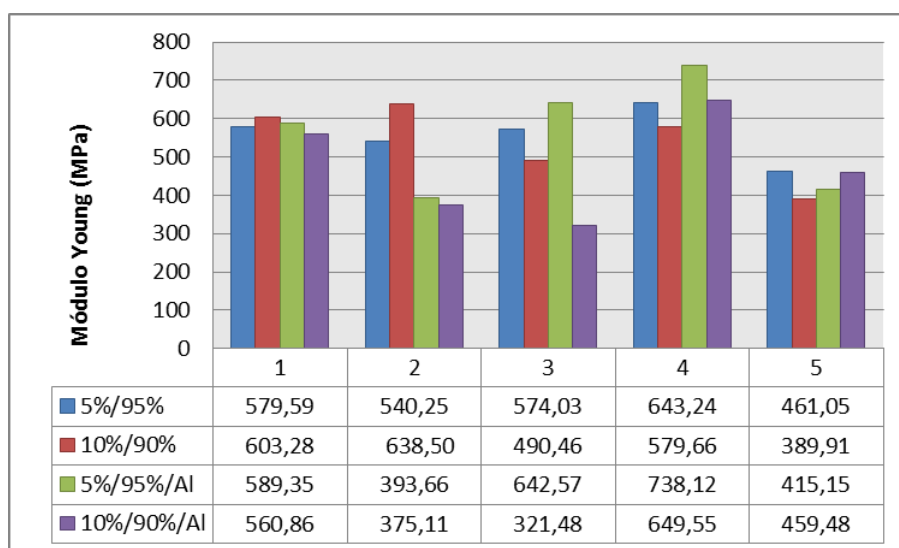


GRÁFICO 7: MÓDULO DE ELASTICIDADE (YOUNG)

A média apresentada para os cinco corpos de prova, de cada tipo, ensaiados foi de 559,63 MPa para os filamentos com 5% p/p de madeira (compósito A), 540,36 MPa para filamentos com 10% p/p de madeira (compósito B), 555,77 MPa para os filamentos com 5% p/p de madeira e com revestimento em alumínio (compósito C) e de 473,30 MPa para os filamentos com 10% p/p de madeira e com revestimento (compósito D). Observa-se que nos filamentos sem revestimento o módulo de Young reduziu à medida que o teor de fibra sofreu acréscimo, o que não era esperado, pois a tendência dos materiais é de aumentarem sua rigidez à medida que incorporam mais serragem na matriz como reforço. Isto ficou ainda mais acentuado nos filamentos com revestimento em alumínio, pois dos cinco corpos de prova analisados apenas um apresentou

módulo Young maior com a maior concentração de madeira, sendo que a média dos filamentos com percentagem de madeira reduzida ficou com módulo Young superior ao compósito com mais serragem.

Também é possível comparar de forma mais fácil a linha de tensão máxima suportada por cada amostra no Gráfico 8.

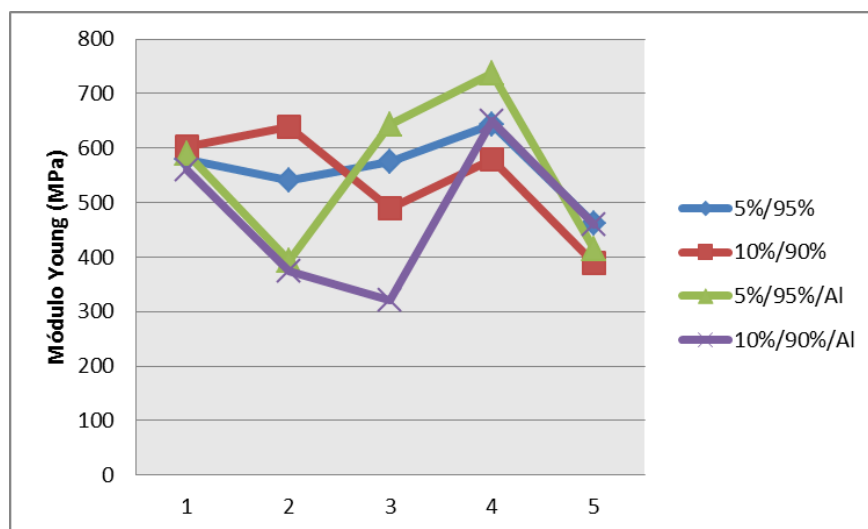


GRÁFICO 8: MÓDULO DE ELASTICIDADE (YOUNG) REPRESENTADO NA FORMA DE LINHAS

O Gráfico 9 mostra uma comparação da média do módulo de Young de cada amostra e pode ser verificado que a pior média de valor de módulo de Young ficou para a amostra com 10% p/p de fibra de madeira e com revestimento em alumínio.

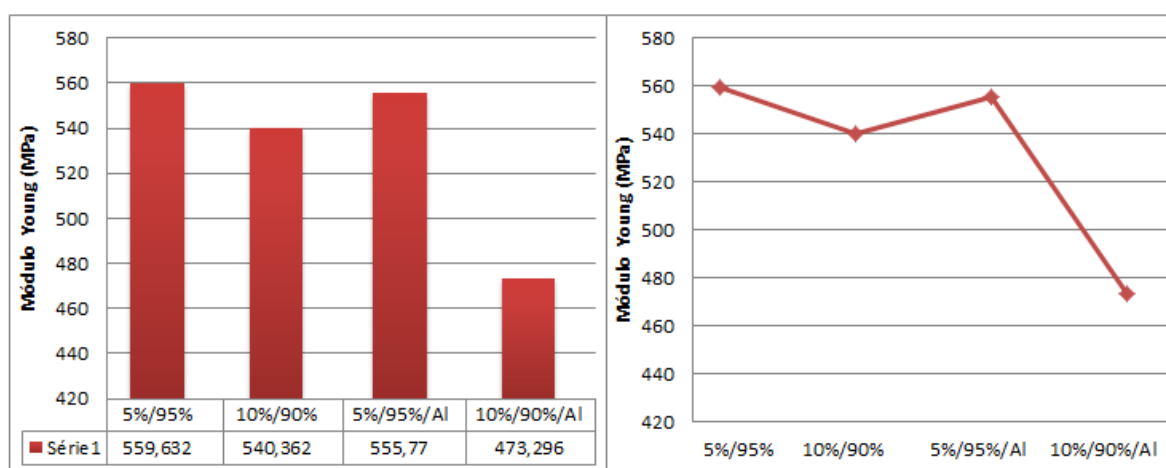


GRÁFICO 9: MÓDULO DE ELASTICIDADE (YOUNG) - COMPARAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS

6.2.6.3 Deformação

A partir do gráfico de deformação dos compósitos, tem-se uma média de 18,51% de deformação para o compósito A (5% p/p de serragem), 18,42% para o compósito B (10% p/p serragem), 22,01% para compósito C (5% p/p de serragem com alumínio) e de 17,25% para o compósito D (10% p/p de serragem com alumínio). Percebe-se que a tendência dos materiais em perderem ductibilidade em função da quantidade de reforço inserido, de acordo com a média dos resultados, foi comprovada nos filamentos com revestimento em alumínio, pois nos compósitos A e B a média foi praticamente igual. Também, ao comparar esses valores com o módulo de Young dos compósitos, a relação inversa entre rigidez e deformação do material é perceptível. O Gráfico 10 mostra a deformação total dos compósitos até a ruptura. Para análise dos gráficos de módulo de Young devem ser considerados os seguintes dados:

Compósito A: 5% p/p de madeira e 95% p/p de polipropileno;

Compósito B: 10% p/p de madeira e 90% p/p de polipropileno;

Compósito C: 5% p/p de madeira e 90% p/p de polipropileno com revestimento em alumínio;

Compósito D: 10% p/p de madeira e 90% p/p de polipropileno com revestimento em alumínio.

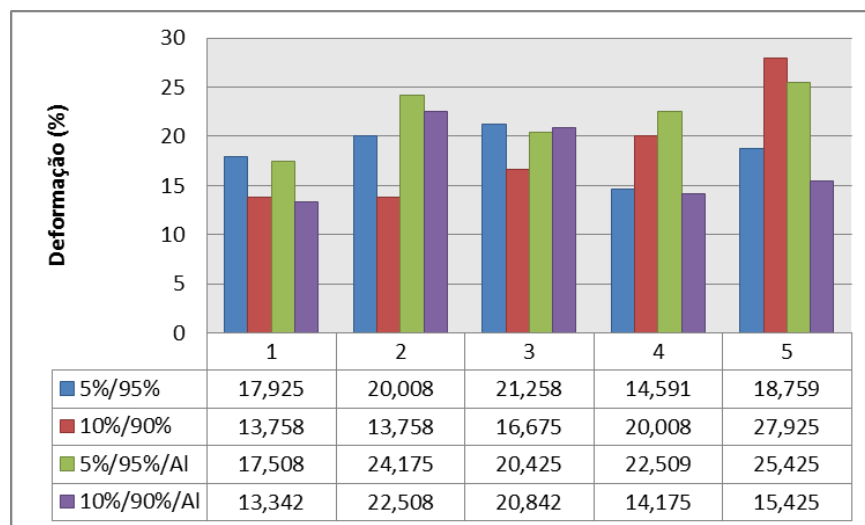


GRÁFICO 10: DEFORMAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Da mesma forma de avaliação feita para a tensão na ruptura, tensão na carga máxima e módulo de Young, é possível comparar a linha de percentagem de deformação suportada por cada amostra no Gráfico 11.

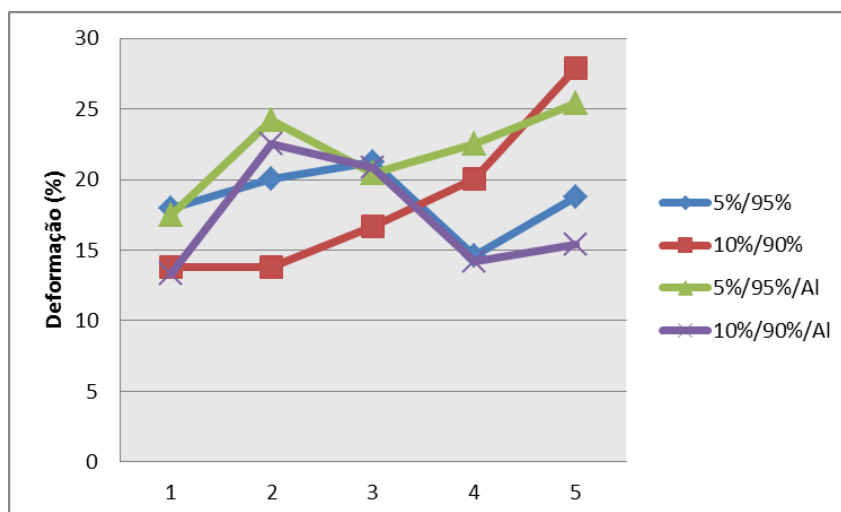


GRÁFICO 11: DEFORMAÇÃO REPRESENTADO EM FORMA DE LINHAS

Verifica-se a grande diferença entre os resultados da percentagem de deformação para cada corpo de prova. A amostra com 5% p/p de fibra de madeira e com revestimento de superfície com alumínio atingiu a maior média do ensaio de deformação, assim como pode ser verificado no Gráfico 12, que apresenta a média de resultado por cada amostra.

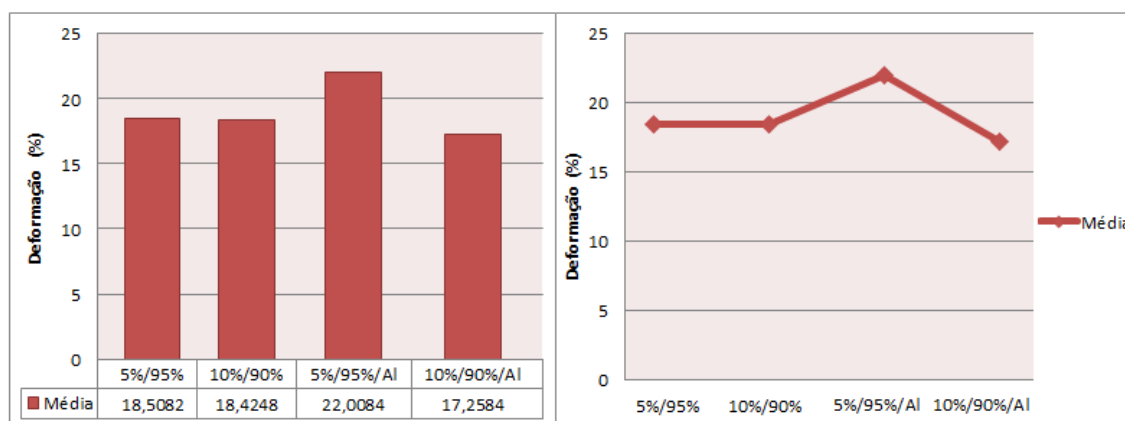


GRÁFICO 12: DEFORMAÇÃO - COMPARAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS

6.2.7 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O ensaio de MEV, para amostras preparadas na segunda etapa deste trabalho, permitiu visualizar os compósitos com as duas percentagens de madeira (5 e 10% p/p). Também foi possível analisar o revestimento de alumínio depositado sobre o substrato dos filamentos.

Foram realizadas análises de topo dos filamentos contendo 5 e 10% p/p de serragem através de duas formas, visualização da superfície de fratura do ensaio de tração e visualização através do corte do filamento. Desta forma, observou-se que as fibras foram bem misturadas ao polímero, ou seja, não ficaram acumuladas apenas em alguns pontos do filamento, o que resultou do fato dos mesmos terem sido reprocessados.

Porém, também ficou visível que as fibras não obtiveram um bom revestimento da matriz, pois é possível verificar pedaços de fibras aparentemente soltas nos filamentos de 5 e 10% p/p de madeira. Isto demonstra que a serragem dispersa na matriz não teve aderência suficiente para promover reforço do material, devido ao fato das fibras estarem se desprendendo do compósito após o ensaio de tração e do corte dos filamentos, como pode ser verificado na Figura 65a e 65b.

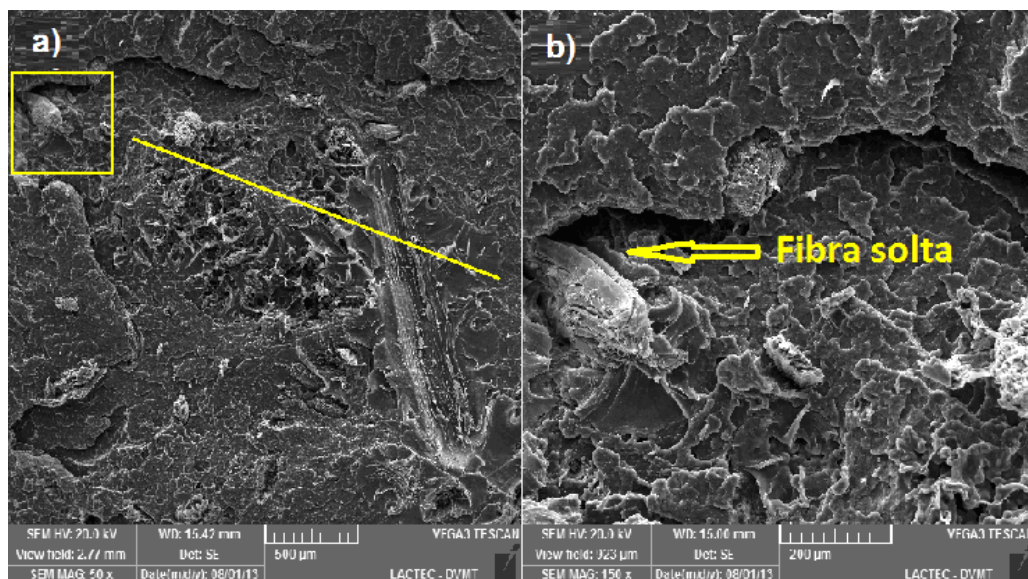


FIGURA 65: a) IMAGEM VISUALIZADA ATRAVÉS DO MEV COM AMPLIAÇÃO DE 50 X, INDICANDO A PRESENÇA DE BAIXA ADESÃO DAS FIBRAS NA MATRIZ. b) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 150 X, CONFIRMANDO A EXISTÊNCIA DE FIBRA DE MADEIRA SOLTA NA MATRIZ

Entretanto, foi verificado que os filamentos revestidos com alumínio apresentaram uma imagem de fratura mais homogênea, ou seja, com melhor dispersão das fibras. Os filamentos com 5 e 10% p/p de madeira, que passaram pelo processo de aspersão térmica, apresentaram ainda fibras de madeira com parte exposta, mas em quantidade reduzida, quando comparado com os mesmos filamentos que não tiveram a deposição de alumínio.

Através da Figura 66a e 66b é possível verificar esta maior aderência entre as fibras e a matriz, porém, também é possível visualizar outro aspecto que é a quantidade de poros existentes nos filamentos com maior quantidade de madeira (10% p/p), que é o filamento representado na imagem. Estes poros não foram visualizados nos corpos de prova com 5% p/p de madeira com revestimento e nem nos corpos de prova com 5 e 10% p/p de madeira sem revestimento. Os poros apareceram em grande quantidade, próximo às bordas dos filamentos, região onde recebeu a deposição de alumínio através da aspersão térmica.

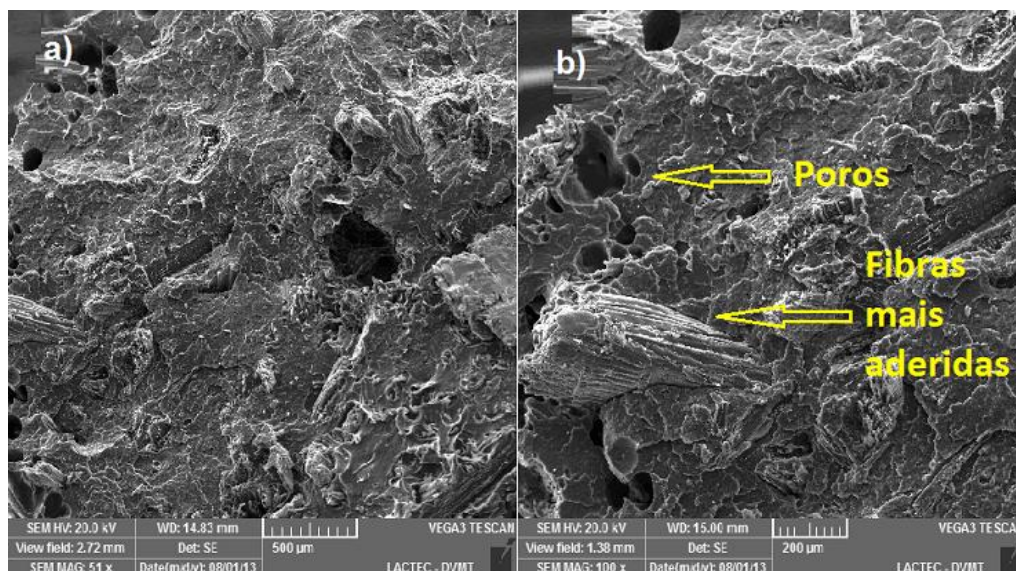


FIGURA 66: a) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 50 X ATRAVÉS DO MEV DEMOSTRA POROS NO COMPÓSITO COM 10% p/p DE MADEIRA APÓS DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO. b) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 100 X ATRAVÉS DO MEV MOSTRANDO DETALHE DOS POROS E DAS FIBRAS DE MADEIRA MAIS ADERIDAS À MATRIZ

Imaginou-se que isto poderia ser uma consequência do calor ao qual o filamento foi exposto durante a aspersão térmica. Desta forma, para confirmar esta possibilidade, foram selecionados filamentos com 5 e 10% p/p de madeira, sem revestimento em alumínio, os quais foram aquecidos em estufa a 120°C, durante

20 min aproximadamente, sendo posteriormente cortados e analisados no MEV. Foram então comparados com a fratura de corte dos mesmos filamentos que ficaram em estufa a 60°C e os resultados foram muito diferentes, como mostra a Figura 67a e 67b. Essas imagens demonstram que os filamentos que passaram por aquecimento a 120°C (Figura 67b) apresentam região de fratura com aspecto muito mais homogêneo, não tendo sido verificado desprendimento de fibras resultante do corte, o que demonstra sinais de boa aderência e adequada dispersão das fibras, características essenciais para que haja reforço mecânico.

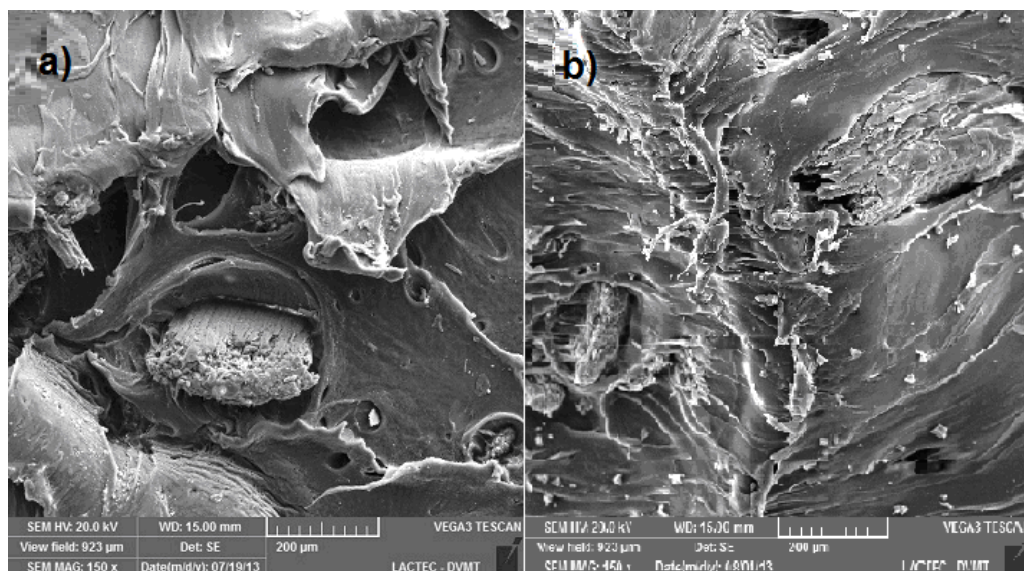


FIGURA 67: a) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 150 X NO MEV DE FRATURA DE COMPOSITO AQUECIDO A 60°C. b) IMAGEM COM AMPLIAÇÃO DE 150 X NO MEV DE FRATURA DE COMPOSITO AQUECIDO EM 120°C

Também foi analisada a superfície dos filamentos, tanto o de composição 5% p/p de madeira quanto o de 10% p/p de madeira. Ambas as superfícies não apresentaram madeira exposta. O que foi possível visualizar também é que os filamentos contendo 5 e 10% p/p apresentaram superfície porosa, com destaque para o compósito com maior quantidade de madeira, o qual está representado na Figura 68a e 68b.

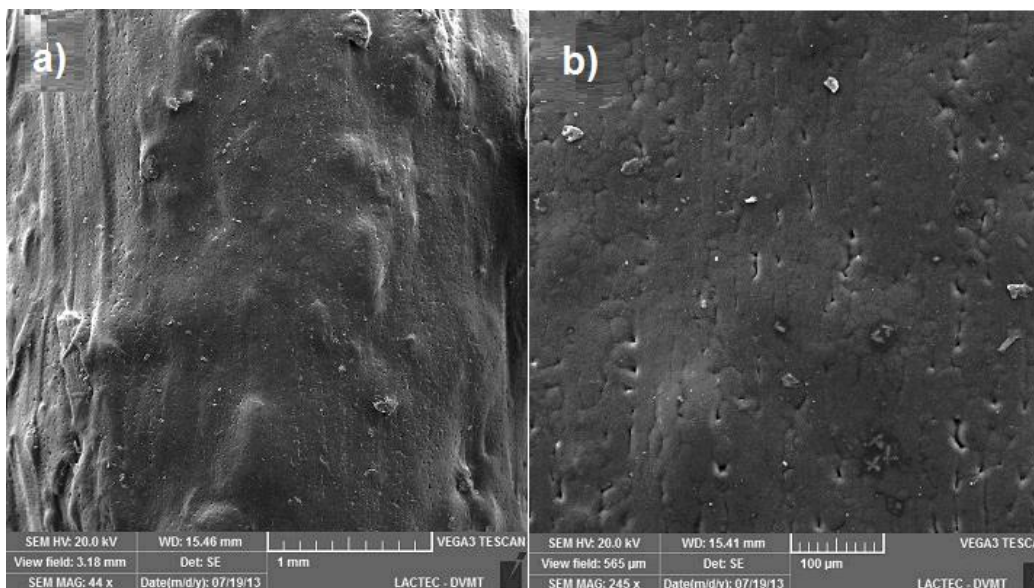


FIGURA 68: a) SUPERFÍCIE DE FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA COM AMPLIAÇÃO APROXIMADA DE 50 X NO MEV. b) IMAGEM DA SUPERFÍCIE DE FILAMENTO COM AMPLIAÇÃO DE 245 X NO MEV APRESENTANDO VÁRIOS POROS

A segunda etapa da análise da superfície dos filamentos teve como objetivo avaliar o alumínio depositado através do processo de aspersão térmica sobre a superfície (substrato) dos filamentos. As figuras 69a e 69b mostram o alumínio depositado sobre a superfície do filamento contendo 5% p/p (69a) e do filamento contendo 10% p/p de madeira (69b).

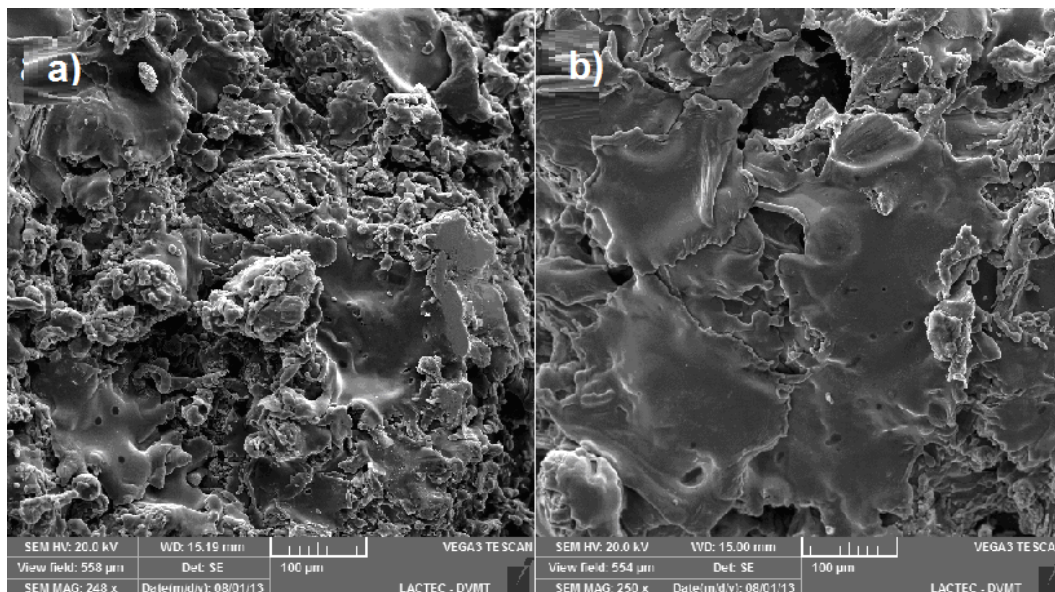


FIGURA 69: a) REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO SOBRE SUBSTRATO DE COMPOSITO COM 5% p/p DE MADEIRA. b) IMAGEM DE MEV DO REVESTIMENTO EM ALUMÍNIO SOBRE SUBSTRATO DE FILAMENTO COM 10% p/p DE MADEIRA

O filamento com 5% p/p de madeira apresentou revestimento não uniforme, sendo verificados vários espaços sem alumínio, caracterizando os poros, além de muitos respingos. O mesmo ocorreu no compósito com 10% de madeira, porém, em menor intensidade, os quais apresentaram algumas “panquecas”, ou camadas, mais definidas. Desta forma, foram avaliados topos (fraturas) e superfície para analisar o revestimento metálico e sua respectiva adesão no substrato polimérico.

No ensaio de topo dos filamentos com revestimento em alumínio, ao analisar as fraturas ocasionadas pelo ensaio de tração, é possível verificar que os filamentos contendo 5% p/p de madeira (Figura 70a) apresentaram parte da borda sem revestimento de alumínio, o que não foi visualizado nos filamentos com 10% p/p de madeira (Figura 70b).

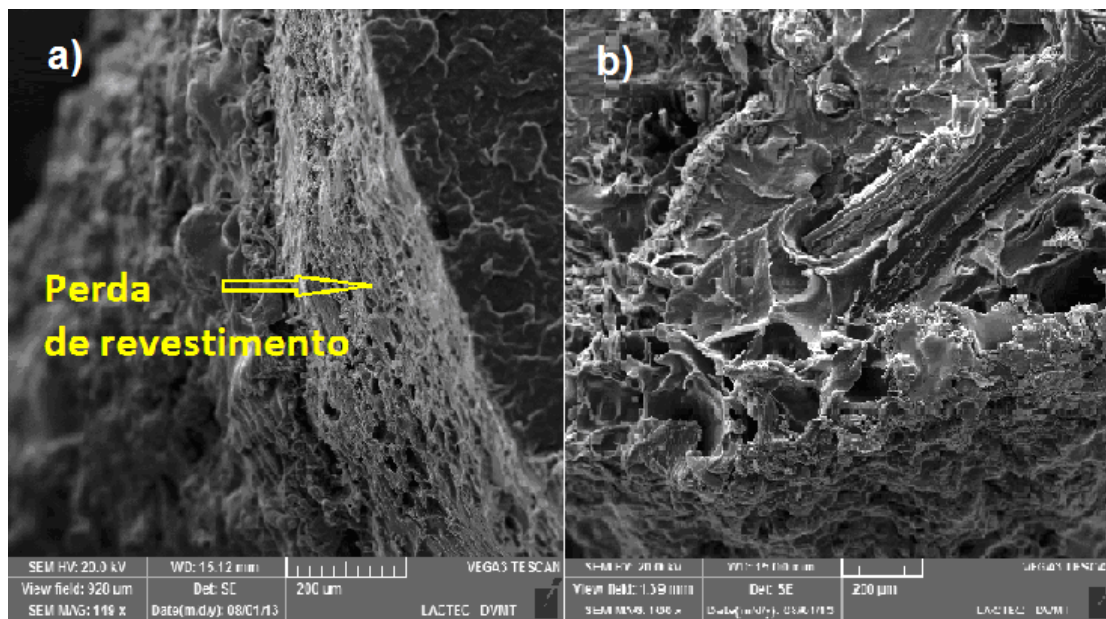


FIGURA 70: a) BORDA COM PERDA DE REVESTIMENTO NOS FILAMENTOS COM 5% p/p DE MADEIRA. b) REVESTIMENTO NOS FILAMENTOS COM 10% p/p DE MADEIRA

Para confirmar o revestimento de alumínio na superfície dos filamentos contendo 10% p/p de madeira, foi realizada a análise de elementos químicos de alguns pontos da Figura 71. Foram analisados 06 pontos da amostra, sendo que o ponto 1 indicou 72,1% de alumínio, 25,4% de carbono e 2,5% de oxigênio, o que representa a camada de alumínio depositada. A presença de oxigênio mostra que o alumínio é oxidado, formando alumina (Al_2O_3). O ponto 2 indicou 100% de carbono, o que indica falta de revestimento metálico, ou seja, presença do substrato puro. O ponto 3 apresentou 65% de carbono e 35% de oxigênio, o ponto

4 indicou 96,2% de carbono e 3,9% de alumínio, o que sugere a presença de fragmentos da camada de revestimento que se alojaram no centro do filamento durante a ruptura. O ponto 5 tem 100% de carbono e o ponto 6 tem 99,4% de carbono e 0,6% de alumínio, o qual já possui uma pequena quantidade de alumínio por estar próximo da superfície.

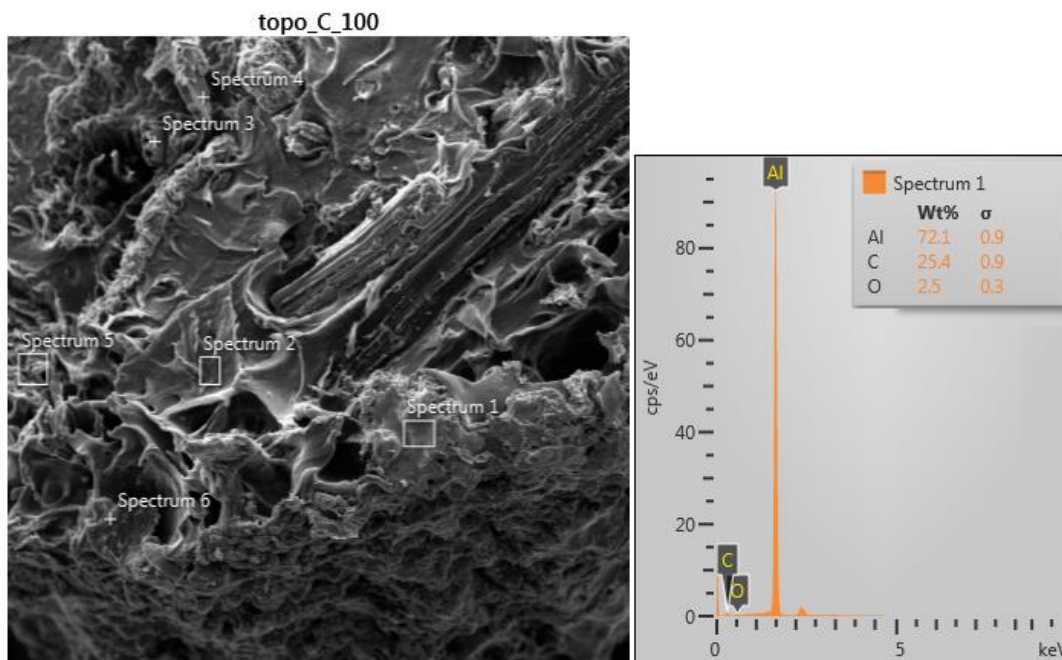


FIGURA 71: ANÁLISE DOS ELEMENTOS QUÍMICOS DA AMOSTRA COM 10% p/p DE MADEIRA REVESTIDA COM ALUMÍNIO

6.2.8 Ensaio de Difratometria de Raios-X

No resultado do ensaio de difratometria de raios-X para os filamentos da segunda etapa (filamento com 5% p/p de madeira representado pela letra C e filamento com 10% p/p de madeira representado pela letra D), em comparação ao PP puro (representado pela letra E), pode ser observado que o teor de madeira não alterou a cristalinidade do PP (Gráfico 13). Como o teor de fibras de madeira era pequeno e a amostra não foi resfriada em água, as macromoléculas tiveram mais tempo para se organizarem, em comparação ao PP que foi resfriado em água (amostra E).

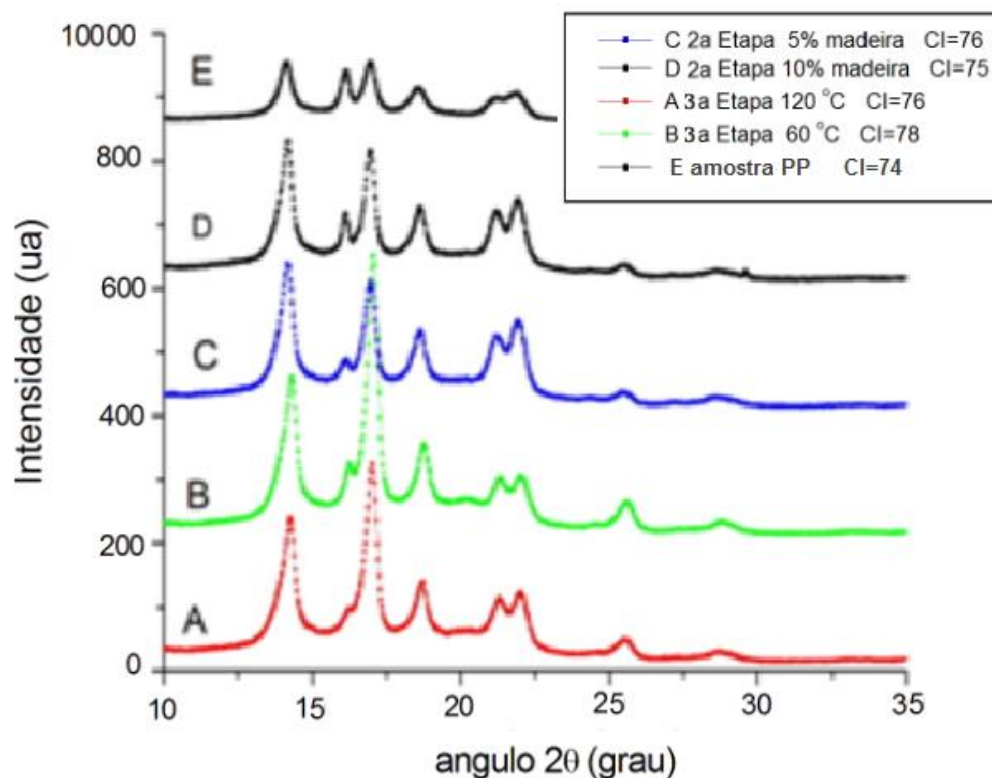


GRÁFICO 13: CRISTALINIDADE PARA COMPÓSITO DA SEGUNDA ETAPA

6.2.9 Ensaio de Perfilometria

Considerando os parâmetros de rugosidade, ou seja, média de rugosidade “Ra”, que é um parâmetro que se baseia na medição da textura da superfície, e de “Rq”, que é um parâmetro que se baseia na medição da textura, as medições da rugosidade foram tomadas a partir da superfície dos filamentos revestidos com alumínio, sendo realizada a média das medidas das amostras, de acordo com a Tabela 16.

TABELA 16: RESULTADOS DE Ra e Rq

Amostra	Média de Ra (μm)	Média de Rq (μm)
Compósito com 5% p/p de madeira	14436,2	17416,8
Compósito com 10% p/p de madeira	23041,6	26358,4

6.3 RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA

6.3.1 Peças Formadas

Nesta etapa, foram produzidos filamentos com tratamento térmico diferenciado, sendo que alguns filamentos foram tratados a 60°C e outros a 120°C. Também foram desenvolvidas algumas peças utilizando os filamentos viscosos, como é caso de um balde, através de molde plástico, apoios de panelas ou copos e peças para decoração (Figura 72a e 72b).



FIGURA 72: a) BALDE E PEÇAS DE APOIO PRODUZIDOS COM FILAMENTOS VISCOSOS. b) PEÇA PARA DECORAÇÃO PRODUZIDA ATRAVÉS DE FILAMENTOS VISCOSOS

6.3.2 Aspersão Térmica na Terceira Etapa de Análise

6.3.2.1 Aspersão térmica com alumínio

Nesta terceira etapa foi depositado alumínio sobre filamentos e em peças (todas contendo 5% p/p de fibras de madeira). A primeira aplicação realizada foi em uma peça de apoio, sem preparo de superfície, e a adesão não foi satisfatória, pois soltou a camada com uma pequena força aplicada sobre ela (Figura 73). Se feita a comparação com a aplicação sobre uma peça contendo 10% p/p de madeira na primeira etapa (Figura 54b), o resultado da deposição nesta terceira etapa apresentou adesão inferior.



FIGURA 73: EFEITO DA ASPERSÃO DE ALUMÍNIO SOBRE PEÇA COM 5% DE MADEIRA DA TERCEIRA ETAPA

Na sequência foi realizada também a aplicação de alumínio sobre os filamentos, assim como foi feito nas etapas anteriores, e o resultado não foi diferente do apresentado na Figura 73, pois, muitos filamentos apresentaram revestimento sem adesão após o segundo passe de alumínio. O revestimento apresentou uma camada de alumínio solta, com muitos pontos descascados e pouca aderência, como pode ser visto na Figura 74a.

Após análise deste resultado, os filamentos passaram por limpeza de superfície com álcool etílico antes de receberem a deposição de alumínio. Este tratamento teve como objetivo a retirada de pontos com resíduos ou gorduras do substrato. Estes filamentos limpos apresentaram resultado de deposição de alumínio satisfatório, assim como pode ser verificado através da Figura 74b.

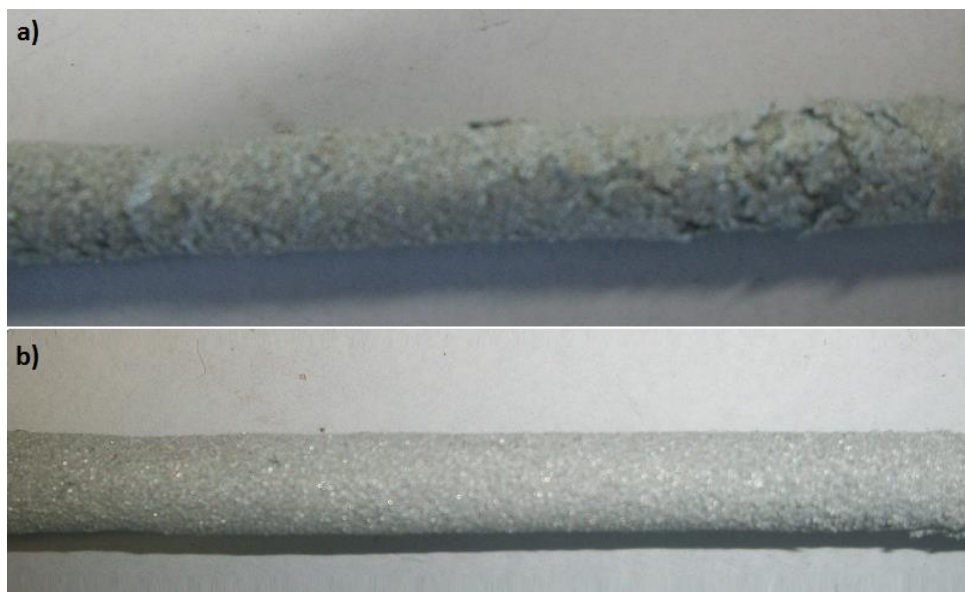


FIGURA 74: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA QUE RECEBEU A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO SEM ANTES PASSAR POR LIMPEZA DE SUPERFÍCIE. b) FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA QUE FOI LIMPO ANTES DE RECEBER A DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO

Na sequência, foi aplicado alumínio sobre um balde, fabricado através da união de filamentos de compósito. O aspecto ficou muito interessante, o que mostra o potencial da técnica para a preparação de objetos decorativos (Figura 75).



FIGURA 75: BALDE PRODUZIDO POR FILAMENTOS COM 5% p/p DE MADEIRA, REVESTIDO COM ALUMÍNIO

6.3.2.2 Aspersão térmica com cobre

O processo de aspersão térmica nos substratos poliméricos utilizando cobre, em vez de alumínio, também foi realizado. As peças utilizadas foram semelhantes às usadas para a aplicação de alumínio, ou seja, iniciou-se a aplicação em uma peça de apoio e na sequência foi feito o teste em filamentos. Nestas peças a deposição de cobre foi feita apenas com o substrato limpo com álcool etílico. Porém, diferente dos resultados alcançados pela deposição de alumínio, e, diferente do relatado na literatura, referente à melhora da deposição quando utilizado material de limpeza no substrato (COSTA et al., 2014), o cobre não depositou sobre o substrato polimérico. O material concentrou-se apenas no encontro dos filamentos, assim como pode ser visto na Figura 76a e na Figura 76b, a qual é um detalhe. O cobre que ficou nos encontros dos filamentos (nos vales) podendo ser removido facilmente, não existindo adesão.



FIGURA 76: a) EFEITO DA ASPERSÃO DE COBRE SOBRE PEÇA E FILAMENTO COM 5% DE MADEIRA, APÓS SEREM LIMPOS COM ÁLCOOL ETÍLICO. b) DETALHE MOSTRANDO A DEPOSIÇÃO DE COBRE APENAS NOS VALES DA PEÇA PLANA E EM PARTE DO FILAMENTO

Foi verificado que mantendo para o cobre os mesmos parâmetros aplicados para o alumínio, ou seja, mesmo substrato, igual número de passes e igual limpeza de superfície, o resultado sobre o compósito foi muito diferente e inferior ao esperado. O mesmo material compósito que aceitou o revestimento com alumínio não facilitou a adesão do cobre quando este entrou em contato com o substrato. Os filamentos passaram, então, pelo jateamento abrasivo com base no

já experimentado e explanado na literatura, como Costa et al. (2014), que conseguiram resultados ainda melhores quando, além da limpeza de superfície, aplicaram jateamento abrasivo com esferas de vidro sobre o compósito que receberia o revestimento.

O resultado da deposição de cobre sobre o substrato do filamento, após o jateamento abrasivo, foi melhor, porém, não revestiu o filamento todo. Desta forma, a Figura 77a e 77b permite a comparação entre o resultado obtido com o filamento apenas limpo com álcool etílico (Figura 77a), no qual apenas alguns pontos de cobre foram fixados no substrato polimérico, e o revestimento do filamento que recebeu o jateamento abrasivo (Figura 77b), no qual houve a deposição de cobre em maior quantidade, porém, sem revestir todo o filamento.

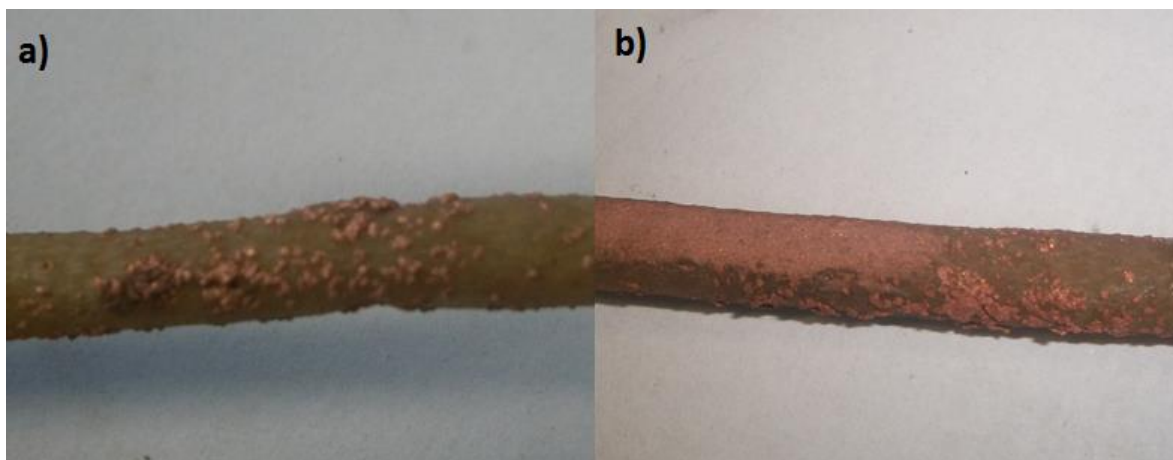


FIGURA 77: a) FILAMENTO QUE TEVE O SUBSTRATO LIMPO COM ÁLCOOL ETÍLICO APÓS RECEBER DEPOSIÇÃO DE COBRE. b) FILAMENTO QUE RECEBEU O JATEAMENTO ABRASIVO ANTES DA ASPERSÃO DE COBRE

Depois de verificado que a rugosidade da superfície favorece a deposição de cobre, pensou-se em aplicar o cobre sobre o revestimento de alumínio. Assim, um filamento que recebeu um revestimento de alumínio e que apresentava, aparentemente, homogênea deposição (Figura 78a) foi utilizado como base para a deposição de cobre, apresentando um excelente resultado, com aplicação bem distribuída e recobrimento total da camada de alumínio, como pode ser verificado na Figura 78b. Na imagem pode ser visualizado que a camada de revestimento apresentou uma trinca, o que foi ocasionado em virtude da espessa camada formada pelo alumínio mais o cobre, ocasionando uma falha coesiva, o que, de acordo com Kim et al. (1989), é uma situação que ocorre quando o substrato e/ou

a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, ocasionando, assim, o rompimento do revestimento.

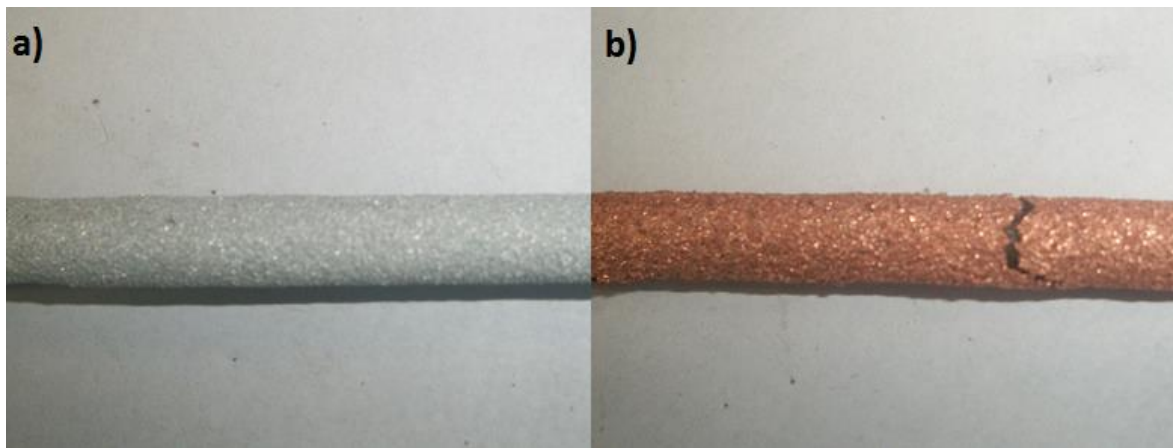


FIGURA 78: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA APÓS REVESTIMENTO EM ALUMÍNIO. b) EFEITO DA ASPERSÃO DE COBRE SOBRE CAMADA DE ALUMÍNIO EM PEÇA COM 5%p/p DE MADEIRA

6.3.3 Ensaio de Dobramento

Nesta etapa foram analisados, através do ensaio de dobramento, os filamentos mantidos em temperaturas diferenciadas (60°C ou 120°C) durante todo o processo, para verificar o impacto da mesma nos compósitos, considerando que na etapa anterior ficou evidente que a exposição dos filamentos à temperatura mais elevada proporcionou melhora acentuada na resistência dos mesmos.

Foram então analisados, nesta terceira fase de dobramento, os filamentos tratados a 60°C e a 120°C. Para os filamentos que receberam tratamento térmico a 120°C, foram analisados dois casos, sendo filamentos da etapa “I”, que são os filamentos após o terceiro processamento, porém, sem irem para estufa após isto, e os filamentos da etapa “L” que receberam ainda mais 8 h de aquecimento em estufa a 120°C. Esta análise foi feita por supor-se que uma exposição muito extensa a temperaturas elevadas, como a 120°C, poderia desencadear o processo de degradação do material. Para os filamentos submetidos à temperatura de 60°C foi analisado o filamento da etapa “J” com estufa a 60°C após o terceiro processamento (ver esquema na página 65).

O filamento “J” ao ser analisado através do ensaio de dobramento apresentou bom ângulo de dobra, porém, quebrou em um tempo médio de 25 s após o início do ensaio (Figura 79).



FIGURA 79: ENSAIO DE DOBRAMENTO DE FILAMENTO COM 5% p/p DE FIBRAS DE MADEIRA E TRATADOS EM ESTUFA A 60°C, COM 24 h DE ESTUFA NO FINAL - J

Os filamentos que estiveram submetidos à temperatura de 120°C durante todo o processo, e que após o terceiro processamento ficaram mais 8 h submetidos à temperatura de 120°C (“L”), também não apresentaram resultado satisfatório, rompendo aos 33 s de ensaio e com pequeno ângulo de dobra (Figura 80).

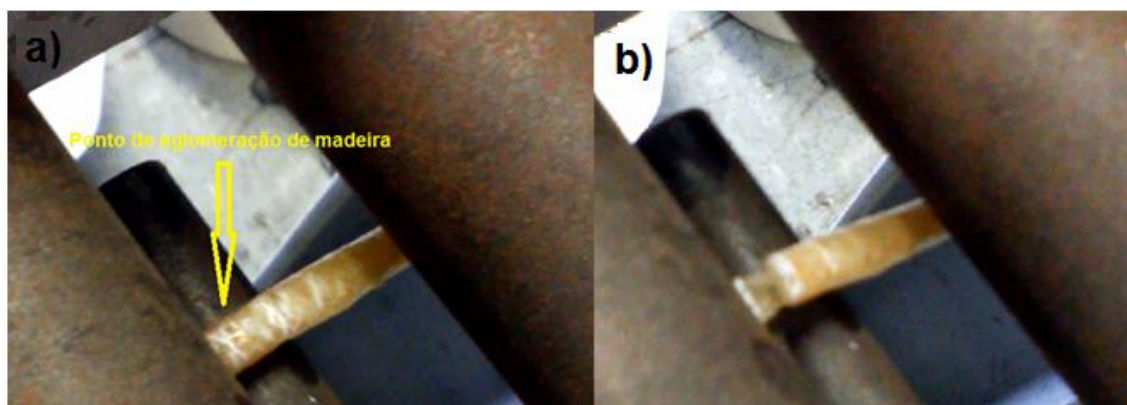


FIGURA 80: a) ENSAIO DE DOBRAMENTO DE FILAMENTO COM 5% p/p DE FIBRAS DE MADEIRA, MANTIDO A 120°C DURANTE PROCESSO DE FABRICAÇÃO E PERMANECENDO POR 8 h NA ESTUFA NO FINAL – L. b) FRATURA DO CORPO DE PROVA “L”

Também passaram pela análise no ensaio de dobramento os filamentos da etapa “I” os quais foram tratados em 120°C e sem estufa após o terceiro

processamento. Os mesmos apresentaram resultado satisfatório, pois dobraram completamente, assim como é possível verificar na Figura 81a e 81b.

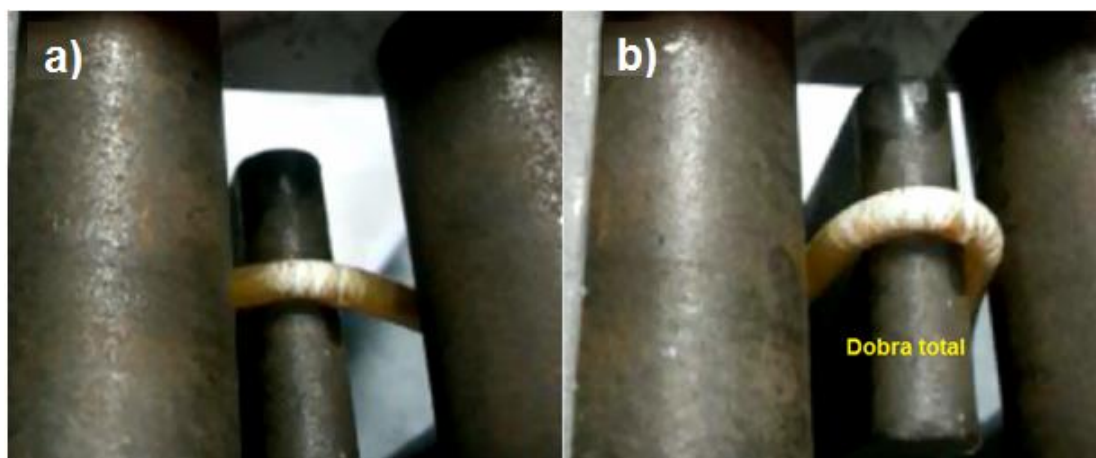


FIGURA 81: a) FILAMENTO COM 5% p/p DE FIBRAS DE MADEIRA E TRATADO EM ESTUFA A 120°C DURANTE ENSAIO DE DOBRAMENTO. b) FILAMENTO TRATADO EM ESTUFA A 120°C APRESENTANDO DOBRAMENTO TOTAL

Por fim, foram ensaiados os filamentos da etapa “M”, os quais ficaram submetidos à temperatura de 120°C e ainda receberam o revestimento em alumínio. Em um tempo médio de 36 s, do início do ensaio de dobramento, os filamentos romperam, apresentando previamente trincas e rompimento do revestimento em alumínio, assim como pode ser visto na Figura 82a e 82b.

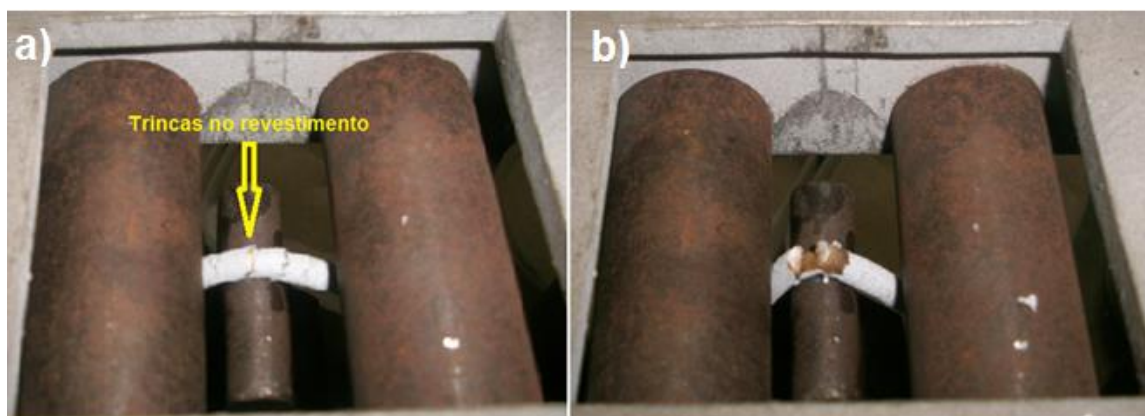


FIGURA 82: a) FILAMENTO DA ETAPA “M” DURANTE ENSAIO DE DOBRAMENTO JÁ APRESENTAVA TRINCAS NO REVESTIMENTO. b) FILAMENTO ROMPEU EM UM TEMPO MÉDIO DE 36 s

6.3.4 Ensaio de Densidade

Nesta etapa foram seguidos os mesmos parâmetros aplicados para o levantamento da densidade na segunda etapa. Algumas amostras desta terceira

etapa, que constam no esquema da página 65, foram analisadas no ensaio de densidade, sendo amostra A (fibras revestidas), D (primeiro processamento com PP, do material submetido à temperatura de 60°C), E (primeiro processamento com PP, do material submetido à temperatura de 120°C), H (segundo processamento do material submetido à temperatura de 60°C) e I (segundo processamento do material submetido à temperatura de 120°C). Foi considerada a densidade da serragem de 1,3 g/cm³, devido à compressão das fibras durante o processo de extrusão, densidade de 0,903 g/cm³ para o polipropileno e de 0,820 g/cm³ do compatibilizante F5 (SANTOS, 2011). A tabela 17 apresenta a densidade experimental e teórica das amostras.

TABELA 17: DENSIDADE EXPERIMENTAL E TEÓRICA DO COMPÓSITO PRODUZIDO NA TERCEIRA ETAPA

Material	Média da densidade experimental (g/cm³)	Média da densidade teórica (g/cm³)
A	0,408	0,935
D	0,656	0,907
E	0,775	0,907
H	0,904	0,907
I	0,909	0,907

Foi também calculado o volume de poros das amostras A, D e E, sendo estas as amostras que apresentaram valores de densidade experimental inferiores aos obtidos pelo cálculo teórico. Para este cálculo foi utilizada a equação 05, apresentada na página 104.

A média do volume de vazio nos corpos de prova da amostra A, analisados nos ensaios de densidade foi igual a:

$$V_v = 0,6324 \text{ g/cm}^3$$

A média do volume de vazio nos corpos de prova da amostra D, analisados nos ensaios de densidade foi igual a:

$$V_v = 0,3789 \text{ g/cm}^3$$

A média do volume de vazio nos corpos de prova da amostra E, analisados nos ensaios de densidade foi igual a:

$$V_v = 0,2478 \text{ g/cm}^3$$

A presença de poros no compósito será confirmada através das imagens de MEV.

6.3.5 Ensaio de Absorção de Água

Os resultados de absorção de água dos filamentos da terceira etapa de ensaios apresentaram bastante diferença entre as amostras tratadas à temperatura de 60°C e as amostras tratadas a 120°C. Estes resultados estão apresentados na Tabela 18.

TABELA 18: ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS FILAMENTOS DA TERCEIRA ETAPA

Amostra 5% p/p fibra	Massa Inicial (g)	Massa após 24 h	Absorção de água (%)
A	0,056	0,064	15,35
B	0,088	0,101	14,75
C	0,075	0,082	10,10
D	0,142	0,148	3,92
E	0,164	0,168	2,12
F	0,170	0,175	2,51
G	0,137	0,139	1,75
H	0,257	0,260	0,93
I	0,296	0,296	0,50
J	0,319	0,321	0,60
L	0,308	0,309	0,30

LEGENDA

	Material exposto a temperatura de 60°C
	Material exposto a temperatura de 120°C

As amostras que mais absorveram água foram as fibras revestidas com o compatibilizante PPMA (amostra A).

O ensaio de densidade relativa já mostrou que estas amostras apresentam muitos poros, o que facilita a absorção de água. Na sequência o que foi

constatado é o que já era esperado, ou seja, houve uma redução gradativa de absorção de água nas amostras à medida que as mesmas foram tratadas com temperaturas de 60°C ou 120°C, ou passavam por novo processamento. Os menores resultados de absorção de água são os apresentados pelas amostras tratadas em 120°C, com uma absorção de somente 0,30%, após 24 h.

6.3.6 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise das imagens de MEV das amostras da terceira etapa desta pesquisa tem como objetivo responder, além do já apontado pelos ensaios de dobramento e absorção de água, as mudanças provocadas nos filamentos proporcionadas pela modificação no processo de fabricação. As principais alterações se resumem no não contato do material com a água, durante a fabricação, sendo os filamentos resfriados lentamente, apenas com a perda térmica para o ambiente. As outras alterações no processo foram o revestimento das fibras com o compatibilizante, antes de processar com o PP, e o tratamento térmico em 60°C ou 120°C.

Serão avaliadas imagens dos mesmos filamentos analisados no ensaio de densidade relativa, sendo amostra das fibras revestidas com PPMA (A), amostra do filamento após processamento das fibras revestidas com o PP e que foram tratados em temperatura a 60°C (D), amostra do filamento das fibras revestidas com o PP e que foram tratadas em temperatura a 120°C (E) e amostra do filamento após o reprocessamento para o material tratado em temperatura de 60°C (H) e 120°C (I). Além destas amostras serão também avaliados os revestimentos de alumínio e cobre sobre o substrato do filamento.

As fibras revestidas (A) apresentaram um grande volume de poros, como mostrado no ensaio de densidade, sendo também as amostras que mais absorveram água, de acordo com o ensaio de absorção de água. Isto fica visível nas imagens com ampliação de 100 X (Figura 83a) e 400 X (Figura 83b).

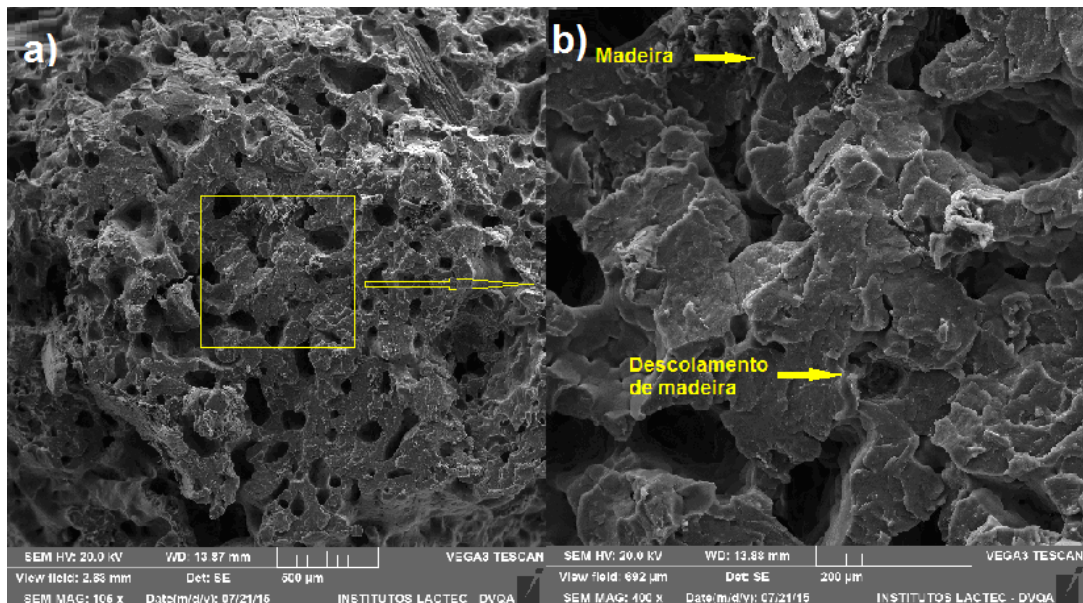


FIGURA 83: a) IMAGEM DAS FIBRAS REVESTIDAS COM PPMA COM AMPLIAÇÃO DE 100 X NO MEV. b) IMAGEM DAS FIBRAS REVESTIDAS COM AMPLIAÇÃO DE 400 X NO MEV

A amostra do filamento após o processamento das fibras revestidas com o PP (D) também confirma o apresentado no ensaio de densidade relativa, por apresentar poros grandes, e também no apontado pelo ensaio de absorção de água, ao ter uma grande facilidade para acúmulo de água (Figura 84a e 84b).

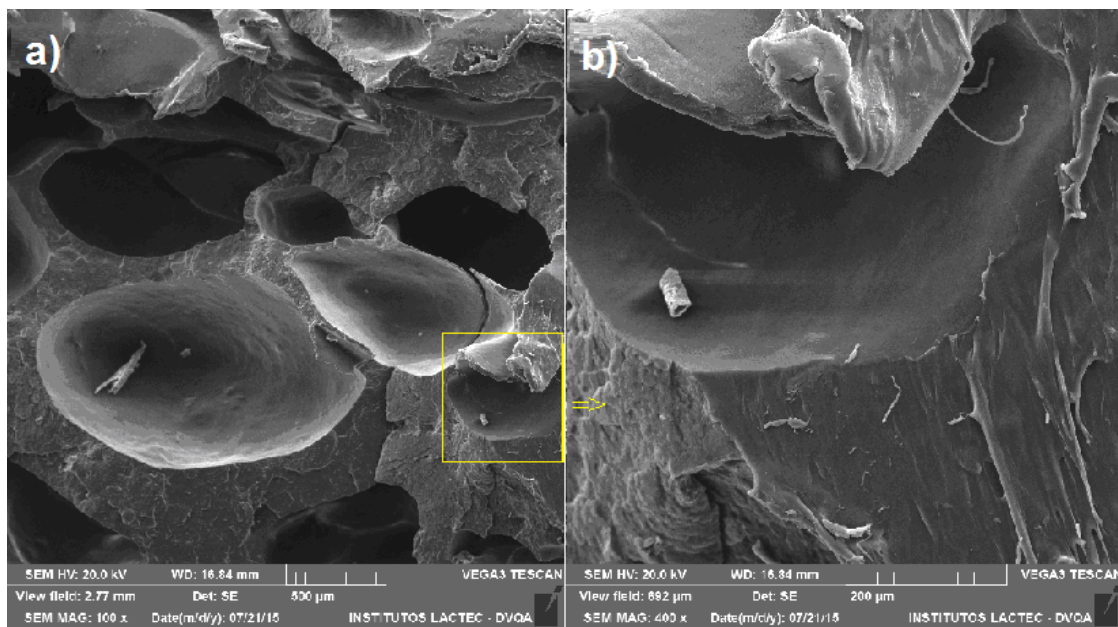


FIGURA 84: a) FILAMENTO APÓS O PROCESSAMENTO DAS FIBRAS REVESTIDAS COM O PP, DEPOIS DE TRATADO EM TEMPERATURA A 60°C, COM AMPLIAÇÃO DE 100 X ATRAVÉS DO MEV. b) FILAMENTO COM AMPLIAÇÃO DE 400 X NO MEV.

A Figura 85 apresenta o corte do filamento tratado com temperatura de 120°C (E), e que foi formado através do processamento das fibras revestidas com o PP. De acordo com o ensaio de densidade os filamentos desta fase já possuem um número reduzido de poros em comparação aos filamentos tratados em temperatura de 60°C, o que pode ser confirmado através da Figura 85a e 85b, as quais mostram poros em menor quantidade e menores, se comparados com a imagem da figura 84.

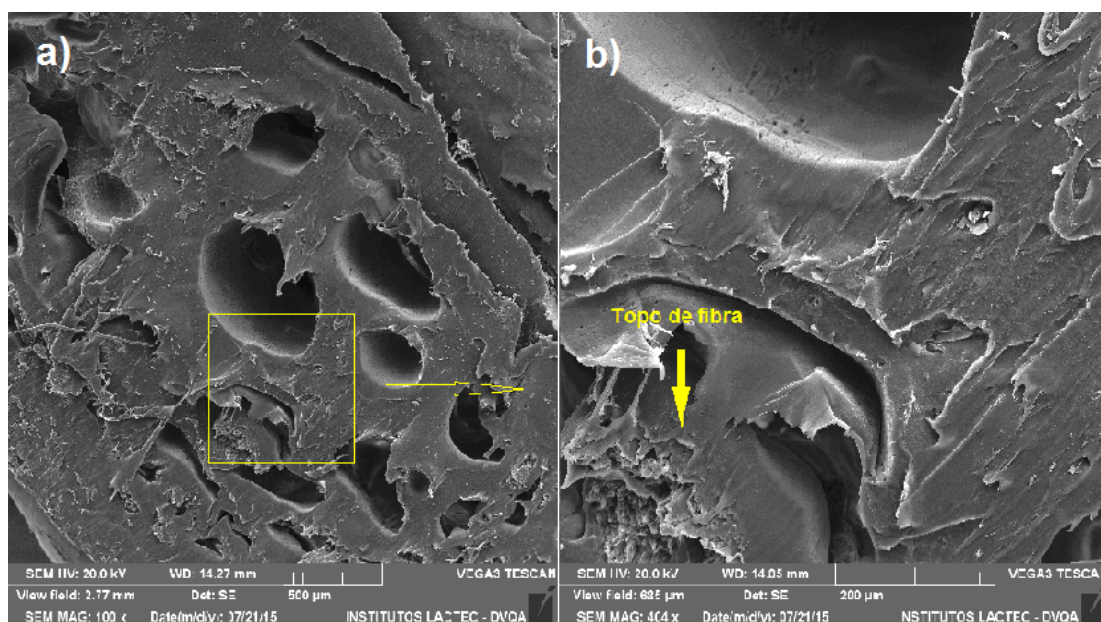


FIGURA 85: a) FILAMENTO APÓS O PROCESSAMENTO DAS FIBRAS REVESTIDAS COM O PP, APÓS TRATADAS EM TEMPERATURA DE 120°C, COM AMPLIAÇÃO DE 100 X. b) IMAGEM DE FILAMENTO TRATADO EM TEMPERATURA DE 120°C, COM AMPLIAÇÃO DE 400 X, INDICA MATERIAL MAIS HOMOGÊNEO

O filamento tratado em temperatura de 60°C (H), e que foi formado após o reprocessamento do material, apresentou aspecto homogêneo, nenhuma fibra aparentemente solta e nenhum poro visível, embora, de acordo com o ensaio de densidade relativa, a densidade experimental tenha ficado com valor um pouco inferior ao da densidade teórica (Figura 86a e 86b).

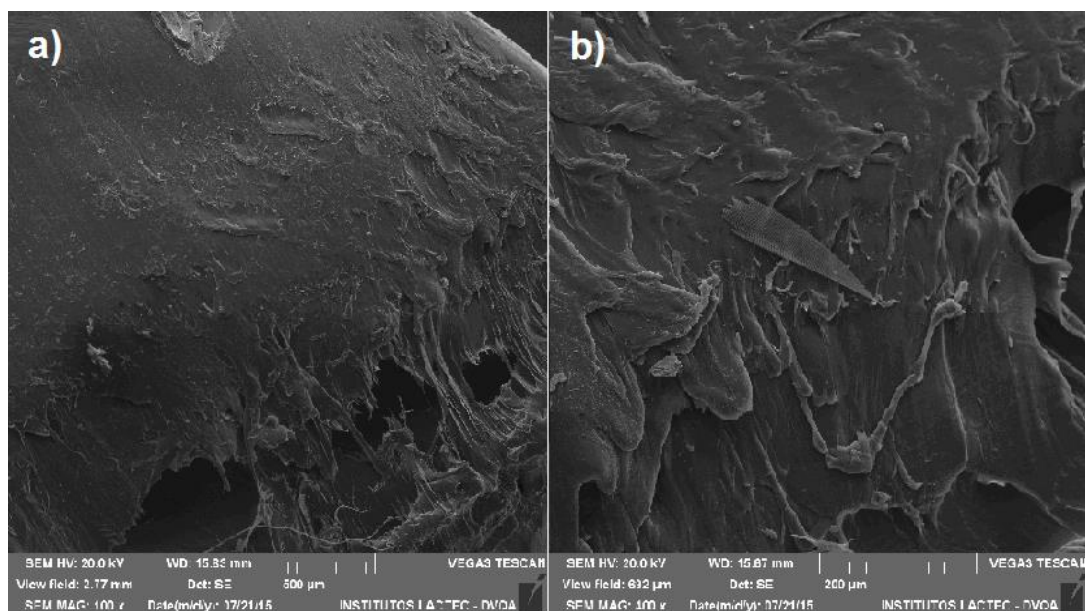


FIGURA 86: a) FILAMENTO APÓS O REPROCESSAMENTO, SENDO TRATADO EM TEMPERATURA A 60°C, COM AMPLIAÇÃO DE 100 X NO MEV. b) FILAMENTO COM AMPLIAÇÃO DE 400 X NO MEV

A Figura 87 mostra o corte do filamento tratado com temperatura a 120°C, e que foi formado através do reprocessamento do material. Este reprocessamento teve como objetivo alcançar um material mais homogêneo, com melhor distribuição das fibras e menor número de poros.

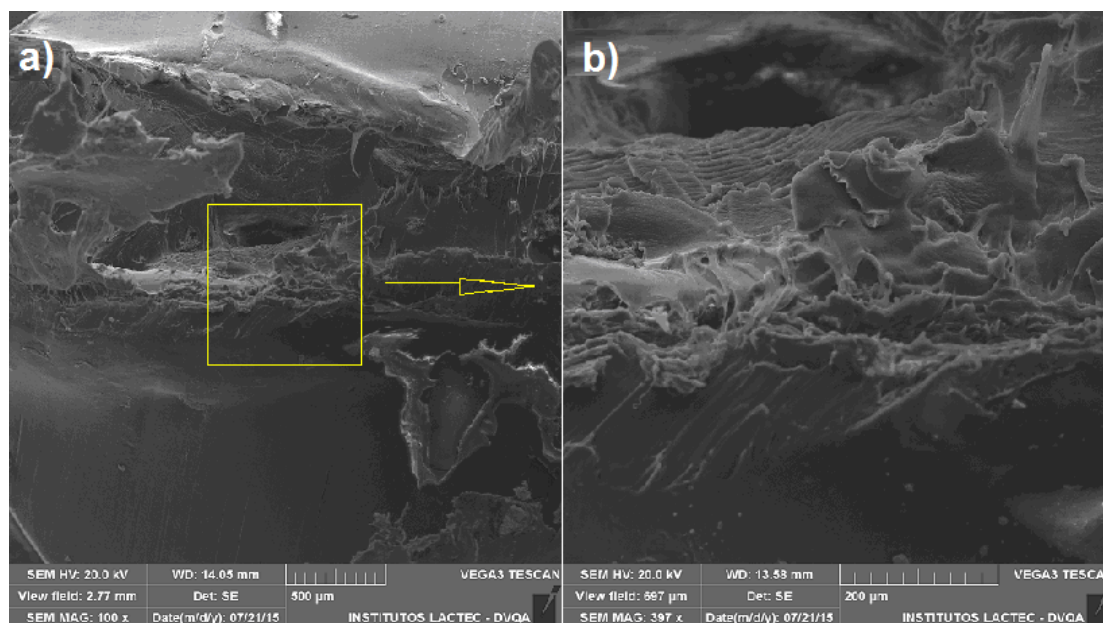


FIGURA 87: a) FILAMENTO APÓS O REPROCESSAMENTO DAS FIBRAS REVESTIDAS COM O PP, E APÓS TRATADAS EM TEMPERATURA A 120°C, COM AMPLIAÇÃO DE 100 X. b) FILAMENTO COM AMPLIAÇÃO DE 400 X NÃO INDICA A PRESENÇA DE POROS OU FIBRAS DE MADEIRA SOLTAS

De acordo com o ensaio de densidade o material não possui poros visíveis, assim como é possível verificar na Figura 87, e o resultado do ensaio de absorção de água indicou uma baixíssima taxa de absorção.

Através da Figura 88a e 88b é possível entender o motivo da deposição nos filamentos da terceira etapa ter sido dificultada. A Figura 88a apresenta a superfície do filamento da terceira etapa (com 5% p/p de fibras de madeira) com ampliação de 400 X, e, para comparação, a Figura 88b apresenta o substrato de um filamento da segunda etapa, também com 5% p/p de fibra de madeira, com ampliação de 250 X. Mesmo com a tentativa de ampliar a imagem do substrato para os filamentos desta terceira etapa, não é possível verificar a quantidade de poros que é visto no filamento da segunda etapa.

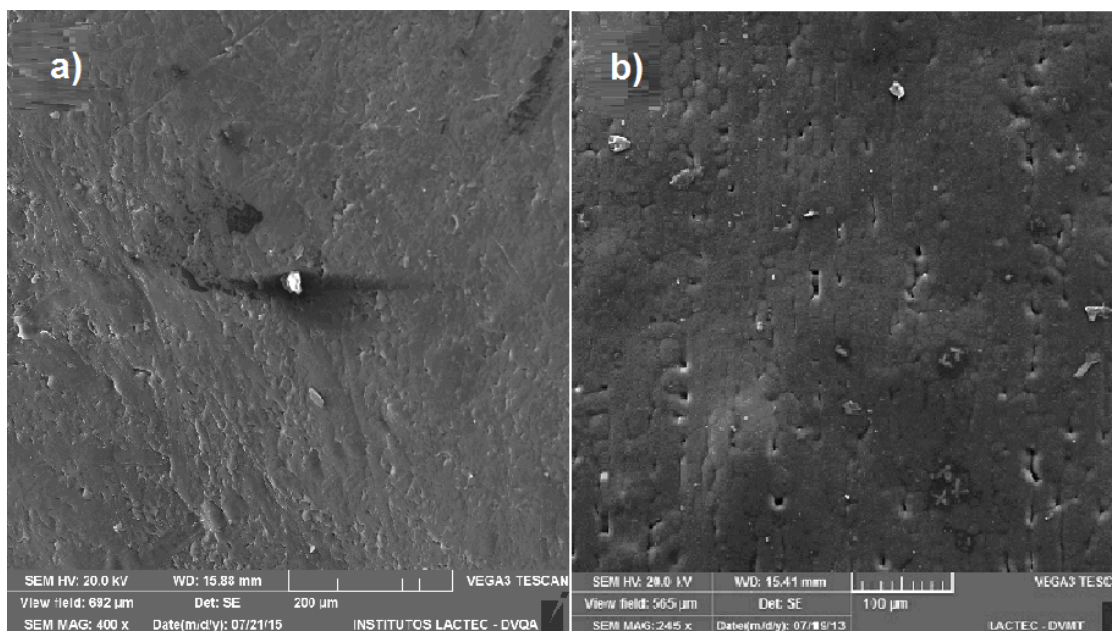


FIGURA 88: a) SUBSTRATO DO FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA DA TERCEIRA ETAPA DE FABRICAÇÃO, COM AMPLIAÇÃO DE 400 X NO MEV. b) SUBSTRATO DE FILAMENTO COM 5% p/p DE MADEIRA DA SEGUNDA ETAPA DE FABRICAÇÃO, COM AMPLIAÇÃO DE 250 X NO MEV

A Figura 89a e 89b apresenta o revestimento do alumínio no composto desta terceira etapa. A Figura 89b (com ampliação de 400X) permite verificar grande quantidade de poros, partículas não fundidas, *pullouts* e gotículas. As “panquecas” ou lamelas não ficaram bem definidas, confirmando o baixo ancoramento mecânico no substrato.

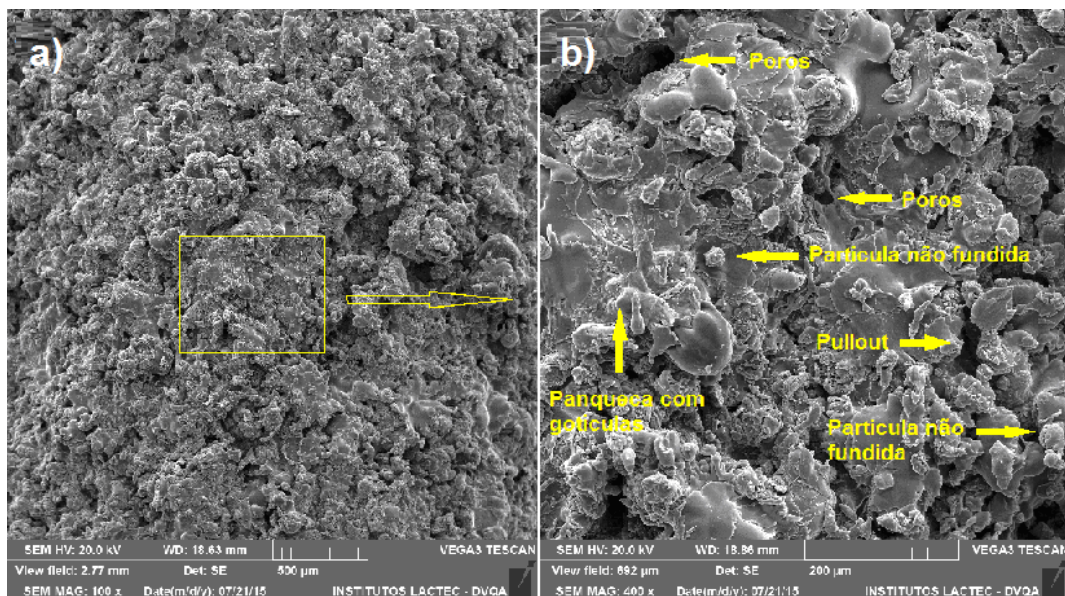


FIGURA 89: a) REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO NO SUBSTRATO POLIMÉRICO COM AMPLIAÇÃO DE 100 X NO MEV. b) REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO EM IMAGEM AMPLIADA EM 400 X NO MEV

Para finalizar a análise das imagens dos filamentos desta terceira etapa, na Figura 90a e 90b é apresentado o revestimento de cobre sobre a superfície do polímero, o qual, assim como já mostrado, não foi eficiente.

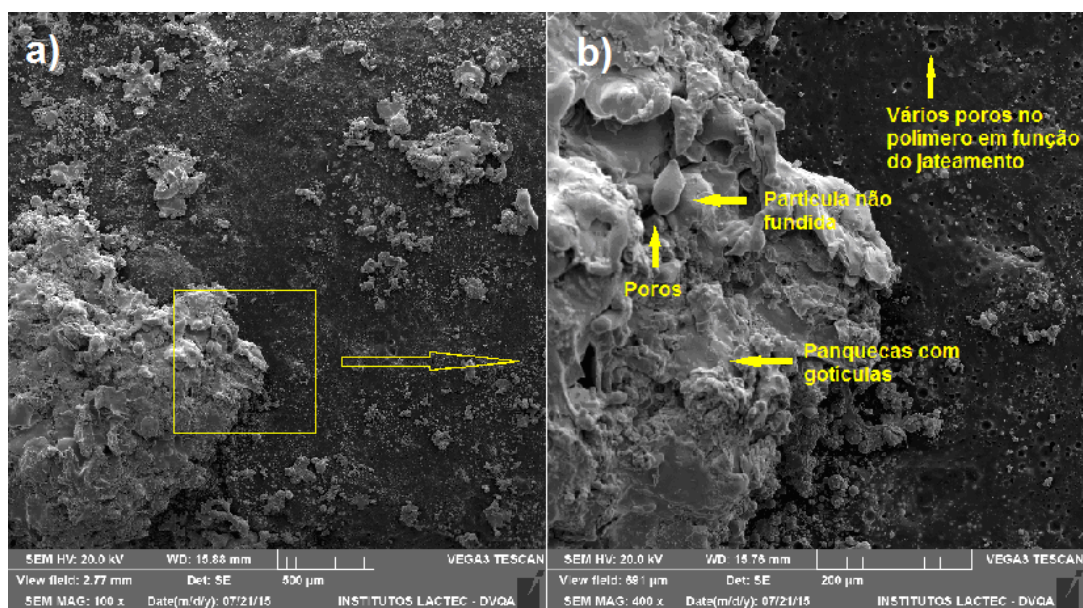


FIGURA 90: a) REVESTIMENTO DE COBRE NO SUBSTRATO POLIMÉRICO COM AMPLIAÇÃO DE 100 X. b) REVESTIMENTO DE COBRE EM SUBSTRATO POLIMÉRICO COM AMPLIAÇÃO DE 400 X

Na Figura 90a é possível verificar boa parte do substrato polimérico sem revestimento de cobre, porém, assim como já visto, uma ampliação de 100 X não é suficiente para avaliar a imagem com mais detalhes. A Figura 90b, com

ampliação de 400 X, apresenta parte do substrato polimérico e parte do pouco cobre que ficou aderido no compósito. Este filamento, além da limpeza com álcool etílico, recebeu jateamento abrasivo, e na figura 90b isto fica evidente, de acordo com a grande quantidade de poros no substrato.

6.3.7 Ensaio de Difratometria de Raios-X

É possível afirmar que nos filamentos da terceira etapa, quando o tratamento térmico foi feito a 60°C (representado pela letra B), a mobilidade molecular do material foi maior e permitiu um melhor empacotamento do compósito (PP/5% p/p de serragem), com aumento do índice de cristalinidade (78%). Esperava-se que a uma temperatura maior, 120°C, a mobilidade molecular fosse maior e, portanto, também o índice de cristalinidade. No entanto, como visualizado no Gráfico 14 (letra A), o filamento tratado a 120°C ficou mais escuro, ou seja, algum processo de degradação do compósito ocorreu e com isso, reações laterais também podem ter ocorrido e, conseqüentemente, reduzido o empacotamento do material que ficou um pouco menos cristalino (76%).

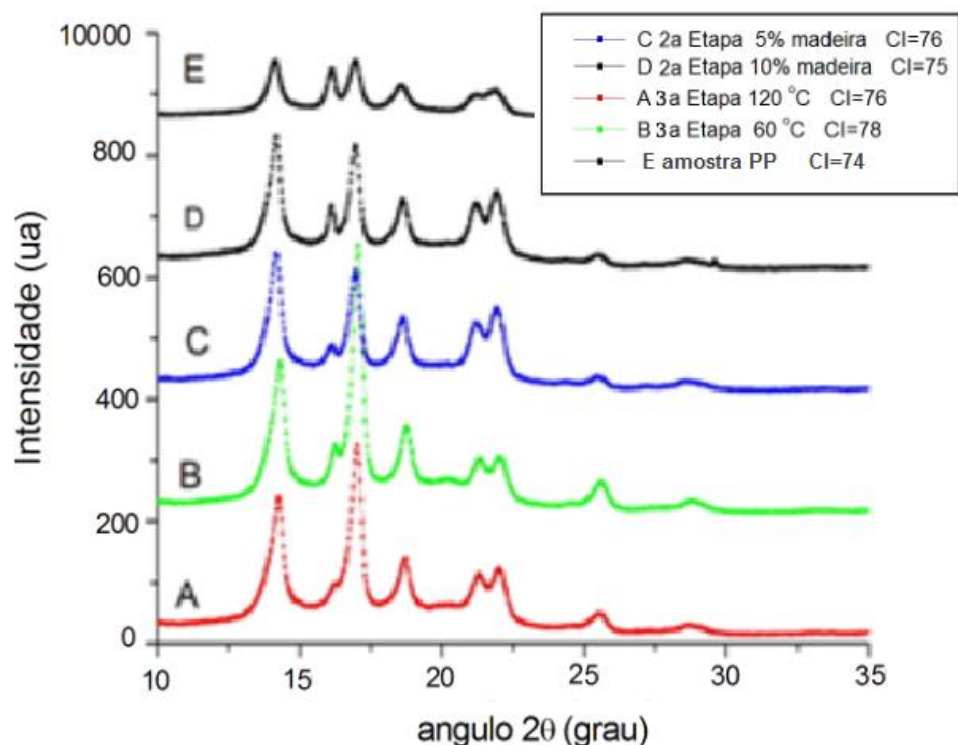


GRÁFICO 14: CRISTALINIDADE PARA COMPÓSITO DA TERCEIRA ETAPA

6.3.8 Ensaio de Perfilometria

De igual forma ao aplicado para as amostras da segunda etapa, os parâmetros de rugosidade, ou seja, média de rugosidade “Ra” (tendo como base a medição da textura da superfície), e de “Rq”, (com base na medição da textura), as medições da rugosidade foram tomadas a partir da superfície dos filamentos revestidos com alumínio, sendo realizada a média das medidas das amostras, de acordo com a Tabela 19.

TABELA 19: RESULTADOS DE Ra e Rq

	Ra (μm)	Rq (μm)
Compósito com 5% p/p de madeira tratado a 60°C	21396,3	26522,6
Compósito com 5% p/p de madeira tratado a 120°C	20018,0	24397,3

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

7.1 ASPERSÃO TÉRMICA SOBRE AS PEÇAS

Com base em todos os resultados de deposição de alumínio sobre o compósito, nas três etapas desta pesquisa, pode-se concluir que a terceira etapa de filamentos foi a que apresentou deposição com menor aderência, sendo a única etapa na qual foi necessário realizar a limpeza dos filamentos para melhorar a deposição. Estes filamentos foram produzidos com apenas 5% p/p de fibras de madeira, tiveram as fibras de madeira revestidas com o compatibilizante, e foram reprocessados para melhorar a homogeneidade. Assim, o compósito apresentou-se com poucos poros, em comparação aos filamentos produzidos na primeira e segunda etapa; porém, o acréscimo da homogeneidade dos filamentos contribuiu para a formação de substratos com menor rugosidade e consequentemente maior dificuldade na adesão de alumínio, quando comparado com as etapas anteriores que tinham maior quantidade de fibras de madeiras (10 e 20% p/p) e maior quantidade de poros e rugosidade de superfície.

Recorrendo à literatura, Costa et al. (2014) e Balart et al. (2012) discutem a adesão e a pintura de poliolefinas termoplásticas como uma notória fonte de problemas, pois o substrato de um polímero sem qualquer tratamento possui grande dificuldade em receber revestimento. Kim et al. (1989), explicam que são três os tipos de falhas de adesão elementares: falha do adesivo, falha coesiva e falha do substrato. Na falha do adesivo ocorre o descolamento ou o desprendimento do adesivo do substrato, devido à má preparação da superfície. Na falha coesiva a ruptura do adesivo ocorre quando o substrato e/ou a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, não ocorrendo descolamento, pois o adesivo se rompe ao meio. Por fim, na falha do substrato, a adesão é mais forte do que a força de coesão interna de ambos ou de um dos substratos envolvidos, e, após solicitação mecânica, a linha de colagem permanece intacta e o substrato se rompe. Desta forma, a deposição inicial de alumínio no substrato do compósito na terceira etapa não encontrou

condição necessária para o ancoramento metálico, apresentando falha no revestimento.

Porém, assim como Costa et al. (2014) conseguiram aumentar em 33% a adesão na superfície do polímero, comparado com superfícies não limpas e não preparadas, apenas limpando o substrato, a aplicação de álcool etílico nos filamentos estudados nesta pesquisa permitiu a deposição de alumínio de forma homogênea e sem a presença visível de trincas ou escamas. Este tratamento consistiu de limpeza da superfície do filamento, que é crítica para o molhamento do substrato, eliminando partículas soltas, umidade, oleosidade, fuligem e poeira, que agem como película antiaderente e não permitem um bom espalhamento e, conseqüentemente, um bom contato com a camada de revestimento (MOITA NETO, 2006).

Outro ponto analisado foi a deposição de cobre nas amostras da terceira etapa de filamentos (com 5% p/p), que, utilizando os mesmos parâmetros utilizados para deposição de alumínio, inclusive o processo de deposição através de chama, apresentou resultado muito inferior.

O cobre é amplamente utilizado porque tem as vantagens como elevada condutividade elétrica e térmica e excelente resistência à corrosão, além da sua aparência muito bonita. Na sua forma pura, no entanto, mostra uma relativa baixa resistência à deformação e resistência à fadiga. E, o reforço em ligas de cobre é limitado devido à baixa solubilidade dos elementos da liga de cobre e a sua estrutura de grãos grosseiros. Vários métodos de processamento, tais como a atomização, derretimento de arames, pulverização, entre outros foram examinados nos últimos anos (LI et al., 2003). Algumas pesquisas sobre deposição de cobre estão relatadas na literatura, porém, com diferentes características e padronização desta presente pesquisa.

Por fim, o cobre apenas fixou-se quando encontrou uma camada de alumínio sobre o substrato do polímero. Com base nisto é possível concluir que a rugosidade encontrada pelo cobre, que é a camada de alumínio já depositada sobre o filamento, permitiu que o cobre, após o impacto no substrato, fosse

aderido com eficiência por já ter uma camada de metal depositada, o que dispensa a necessidade de tratamentos superficiais mais sofisticados ou velocidade de deposição mais elevadas. Também, com base na literatura, pode-se sugerir que a deposição de cobre realizada sobre as peças e filamentos nesta pesquisa não obtiveram o mesmo resultado alcançado pelo alumínio em função do cobre necessitar de maior pressão/velocidade das partículas; e, ao seguir as mesmas especificações de velocidade e pressão de pulverização do alumínio, não atingiram energia suficiente para aderir ao substrato polimérico, mesmo este tendo recebido tratamento através de limpeza com solvente e abrasivo.

Desta forma, como o impacto das partículas subsequentes não possui energia suficiente para aderir à camada inferior de metal, devido à sua velocidade insuficiente, metais com maior peso específico, como o cobre, são mais difíceis de ancorar em substratos poliméricos. Neste caso, a energia de impacto não foi adequada para formar um revestimento sólido com o cobre. Ao aumentar a pressão de entrada do bocal (isto é, a velocidade das partículas), na tentativa de formar um revestimento sólido, poderia ocorrer forte erosão, com a formação de crateras vazias sobre a seção transversal do polímero.

E por fim, embora a velocidade da partícula seja adequada para a formação de um revestimento de cobre, a energia e tensão de impacto transmitidas a partir da partícula para o substrato não pode exceder a resistência do material, o que ocasiona a sua erosão. Desta forma, os resultados experimentais, quando se utiliza cobre e alumínio, sugerem que o material ideal para se obter a deposição de metal sobre substratos feitos de plástico ou superfícies compostas devem ser caracterizados por baixa densidade a fim de evitar a erosão do substrato.

7.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Os resultados preliminares com este ensaio indicaram que a resistência do filamento teve um acréscimo quando o substrato recebeu revestimento de alumínio. Também verificou-se que a camada de revestimento teve uma boa adesão ao substrato do compósito, pois não houve fissura aparente, no revestimento, mesmo após o ensaio de dobramento, que ocasionou o rompimento

do filamento. Portanto, peças moldadas a partir de filamentos viscosos e, depois, revestidas com Al através do processo de aspersão térmica podem ser obtidas e ficam mais reforçadas. A aparência do revestimento de Al obtido com o processo de aspersão térmica à chama é rugosa, áspera e com textura diferenciada de revestimentos de pátina de alumínio, por exemplo.

Por outro lado, os filamentos sem revestimento em alumínio, quando aquecidos, apresentaram também um melhor desempenho no ensaio de dobramento, em especial quando os mesmos foram aquecidos a 120°C. Filamentos com 5 e 10% p/p da segunda etapa e filamento contendo 5% p/p de madeira em sua composição da terceira etapa, quando foram aquecidos e analisados no ensaio de dobramento, não romperam e nem apresentaram trincas em seu revestimento, completando o ensaio de forma satisfatória.

Conclui-se que a exposição do filamento compósito à temperatura acima de 50°C ajuda de alguma forma a melhorar a resistência do mesmo, pois, a mobilidade molecular dos polímeros aumenta com o aumento da temperatura, e, provavelmente, há uma temperatura ótima onde o compósito aquecido consegue uma mobilidade molecular suficiente para se tornar mais homogêneo, o que aumenta a sua resistência. Além disso, a temperatura de deflexão térmica do PP é de 100°C a 0,46 MPa e 70°C a 1,8 MPa.

A norma ASTM D648 descreve os ensaios de determinação de deflexão térmica; porém, esta temperatura pode ser descrita como a temperatura a partir da qual o escoamento viscoso do material se torna significativo. Embora não tenha sido determinada a temperatura de deflexão térmica dos compósitos, em virtude da adição de serragem ter sido muito pequena, 5% p/p para os filamentos com melhor moldabilidade, pode-se inferir que a temperatura de deflexão térmica dos compósitos é próxima à do PP.

Este resultado obtido no ensaio de dobramento demonstra que, provavelmente, o polipropileno submetido a um recozimento (*“annealing”*), tornou-se mais cristalino e, portanto, mais resistente, além de ser possível ter ocorrido uma melhor interação entre as fibras de madeira e a matriz polimérica. A melhor

dispersão dos filamentos submetidos a tratamentos térmicos foi confirmada através do ensaio de Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Desta forma, o que pode ser concluído é que os filamentos ficam tensionados, o que é aliviado com o tratamento térmico a 120°C, além do provável aumento da cristalinidade do material. As amostras submetidas a diferentes tratamentos térmicos foram analisadas através de difratometria de raios-X para a comparação da cristalinidade dos diferentes materiais. A presença da serragem induz à quebra no teste de dobramento, mas, tanto o filamento que recebeu o revestimento de Al como o que ficou na estufa, tiveram tensões aliviadas e por isso dobraram.

No entanto, também devemos considerar que a resistência mecânica superior dos filamentos revestidos é devido à presença da camada de Al que é muito mais resistente do que o compósito. Esta deposição, aliada com a temperatura aplicada sobre o compósito no momento da aspersão térmica, pode ocasionar o amolecimento de uma fina camada externa do filamento e esta camada pode favorecer a adesão do alumínio, e, assim, o reforço mecânico.

Algo importante a ser observado é que os filamentos da terceira etapa que apresentaram o melhor resultado no ensaio de dobramento foram os tratados em temperatura a 120°C, porém, sem revestimento de alumínio e sem nova exposição à estufa, em temperatura a 120°C, após o reprocessamento. Pois, os mesmos filamentos que apresentaram resultado satisfatório depois de submetidos a 120°C durante o processo de fabricação, apresentaram redução na sua resistência após receberem a deposição da camada de alumínio ou quando foram mantidos em estufa por mais 8 h em temperatura de 120°C. Provavelmente o que aconteceu é que o material começou a degradar após a exposição prolongada a temperatura de 120°C, tendo suas propriedades reduzidas se submetido a novo aquecimento.

7.3 ENSAIO DE DENSIDADE

A análise da densidade nos corpos de prova da segunda etapa desta pesquisa demonstrou resultados experimentais e teóricos semelhantes, o que já

era esperado, uma vez que as concentrações para a composição final dos materiais produzidos foram previamente calculadas, embora pudesse ter ocorrido perda de serragem, a qual é muito leve. Dos materiais analisados, amostras com 5% p/p de madeira apresentaram menor diferença entre a densidade experimental e a teórica, quando comparado com as amostras de 10% p/p de madeiras.

Para os filamentos analisados da terceira etapa de ensaios, a densidade experimental das fibras revestidas ficou muito inferior à teórica. As amostras do material após o primeiro processamento das fibras revestidas com o PP virgem também apresentaram densidade experimental inferior à teórica, sendo que as amostras tratadas em temperatura de 60°C ainda tiveram densidade experimental inferior a das amostras tratadas com 120°C. Densidade experimental inferior à teórica não é satisfatório, pois confirma a presença de poros, os quais foram visualizados através do MEV, e que serão apresentados na sequência. Assim como já foi explicado, essa presença de vazios afeta negativamente a resistência do material. Para esta etapa os filamentos que foram reproprocessados foram os que tiveram os melhores resultados no ensaio de densidade, com valores similares para densidade experimental e teórica.

7.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados da terceira etapa foram muito superiores, pois apresentaram uma baixa absorção de água, se comparado aos resultados alcançados na segunda etapa, em virtude do revestimento das fibras, do reproprocessamento do material e do tratamento térmico. Amostras com 5% p/p de fibras submetidas ao ensaio de absorção de água na segunda etapa apresentaram absorção média de 3,52%, sendo que amostras com a mesma percentagem de fibras de madeira, de compatibilizante e de PP, apresentaram, na terceira etapa, resultado de 0,30% de absorção de água, ou seja, aproximadamente 90% inferior.

Os compósitos da segunda e terceira etapa foram preparados com compatibilizante F5, o qual apresenta maior índice de fluidez, o que também é bom para a atual pesquisa, já que fica mais fácil o molhamento das fibras de

madeira durante o processo de revestimento das fibras. Isso se deve ao fato de que o aumento no índice de fluidez do compatibilizante aumenta sua molhabilidade, resultando em melhor revestimento das fibras e menor exposição das mesmas ao ambiente (SANTOS, 2011).

Uma vez que a umidade penetra no interior dos materiais compósitos as fibras tendem a inchar. Quando as fibras de madeira são revestidas com o PPMA, além da obtenção de uma boa interface fibra/matriz, a dispersão das fibras na matriz de PP é facilitada, tornando o material mais homogêneo. A serragem quando aglomerada na matriz tende a tornar o material compósito muito mais vulnerável à absorção de água, pois a serragem é um material bastante hidrofílico, e o baixo recobrimento por parte da matriz tende a deixar a serragem mais exposta e vulnerável ao ambiente e à umidade (YANG et al., 2006). Com base nisto, os melhores resultados obtidos na terceira etapa deve-se ao fato das fibras revestidas com PPMA antes do processamento com PP, ao tratamento térmico e ao reprocessamento, que favoreceram a redução do número de poros e permitiram uma maior homogeneidade do material, o que será confirmado através das imagens de MEV.

7.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

A partir dos resultados de tração dos filamentos da segunda etapa desta pesquisa, é possível verificar a importância do revestimento das fibras na preparação dos compósitos, pois a preparação dos compósitos sem revestimento das fibras reduz a dispersão das mesmas, as quais tendem a se aglomerar entre si, dificultando o molhamento destas pela matriz. Além disso, a preparação dos compósitos sem revestimento das fibras diminui muito a probabilidade de interação entre a amostra de PPMA e as fibras, cujo reforço só acontece quando estão em contato direto (SANTOS, 2011).

A aglomeração da serragem tende a tornar o material compósito muito mais vulnerável à absorção de água, pois a serragem é um material bastante hidrofílico e o baixo recobrimento por parte da matriz tende a deixar a serragem mais

exposta ao ambiente e à umidade. O próprio aumento da serragem ocasiona o aumento da taxa de absorção de água no material (WAMBUA et al., 2003; YANG et al., 2006). O ideal é que o compatibilizante, o PPMA, seja colocado próximo às fibras de madeira, onde vai atuar no aumento da adesão fibra/matriz.

Um aumento na concentração de serragem também pode ocasionar uma redução nas tensões máximas dos materiais compósitos, fato que pode ser atribuído à má dispersão das fibras ao longo da matriz, pois, se a adesão é boa a tendência é de aumentar a resistência do material compósito com o aumento na concentração de serragem, que foi utilizado como reforço.

O módulo de elasticidade pode ser considerado como sendo uma medida de rigidez ou de resistência do material. Quanto maior esse módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma determinada tensão (maior rigidez). Pela Lei de Young observa-se que a tensão é diretamente proporcional à deformação. Desta forma, altos valores do módulo de Young representam situações onde são necessárias altas tensões para obter baixas deformações decorrentes das altas resistências às mobilidades intermoleculares, normalmente ocasionadas por fortes atrações químicas intermoleculares, reticulações químicas ou presença de domínios cristalinos.

Desta forma, o ensaio demonstrou a provável falta de homogeneidade do material da segunda etapa, ao percebermos grande diferença de valor entre os corpos de prova de cada amostra. Também deixa claro que não houve boa adesão fibra/ matriz, o que também foi comprovado pelas imagens de MEV dos compósitos da segunda etapa. Esta falta de adesão ocasiona a fragilidade do material à medida que a quantidade de fibras é acrescentada. Quando a adesão interfacial é fraca e quando ocorre o descolamento das fibras, o transporte por microfissuras inclui o fluxo de armazenamento de água nas fissuras, poros ou pequenos canais na estrutura do compósito. Essas imperfeições podem ser originadas durante o processamento do material ou devido a efeitos ambientais. Então, valores maiores de Módulo de Young e menores de resistência à tração e alongamento na ruptura sugerem que a adesão interfacial é pobre e requer melhorias (SANTOS, 2011; WAMBUA et al., 2003).

7.6 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Na realidade, o pequeno teor de fibras de madeira (5% p/p) na matriz de PP, mesmo havendo uma ótima dispersão das fibras e uma boa adesão na interface fibra/matriz, não é o suficiente para que o potencial de reforço das fibras seja alcançado. Santos et al. (2015) mostraram que compósitos contendo até 35% p/p de fibras de madeira de Pinus podem reforçar o PP. No entanto, o objetivo do uso de apenas 5% p/p de fibras de madeira não foi para reforçar o PP mas sim para dar uma maior flexibilidade aos filamentos, conferir maior rugosidade e polaridade ao material que, em etapa subsequente, seria submetido ao revestimento metálico através do processo de aspersão térmica.

Sendo assim, analisando o resultado do processo de deposição à chama e comparando os revestimentos dos filamentos com as duas concentrações de madeira, levando também em consideração que ambos os substratos não receberam pré-aquecimento e nem jateamento abrasivo, o revestimento não foi homogêneo, pois além das falhas no revestimento, também houve diferença na morfologia da superfície dos filamentos. No geral, os compósitos com 5% de madeira apresentaram panquecas menos homogêneas, com muitas gotículas e poros de pequeno porte, além de alguns poros grossos, não apresentando uma morfologia adequada.

Os filamentos com maior concentração de madeira apresentaram panquecas homogêneas em maior quantidade, com menor número de gotículas, que ficam dispostas ao redor das panquecas e pequenos poros no interior das mesmas, o que demonstra que o revestimento ficou mais bem acomodado à textura do substrato, ou seja, ocorreu uma melhor ancoragem das partículas sobre o substrato.

O aparecimento de gotículas está ligado, no geral, a baixa temperatura do substrato, formando, assim, *splats* irregulares. Quando se utiliza temperaturas mais altas a redução dos respingos é verificada, sendo formado *splats* na forma de discos circulares. Normalmente, uma partícula de aspersão térmica em uma superfície não aquecida vai espirrar, formando um indicador fragmentado, com

bordas irregulares. Uma gota começa a congelar ao longo de suas bordas, onde ela tem o primeiro contato com o substrato mais frio. A taxa de solidificação depende de ambas as temperaturas, do substrato e das gotículas, e também da resistência térmica de contato entre os dois, que varia de acordo com a rugosidade da superfície e com a presença de quaisquer contaminantes de superfície (BRADAI et al., 2008; EL-HADJ et al., 2010).

O pré-aquecimento do substrato é um dos fatores que influenciam a temperatura de revestimento, o qual tem por finalidade principal a remoção de água, pois isso também diminui a taxa de solidificação. Tal comportamento físico aumenta o contato físico entre a gotícula e o substrato. Características clássicas de um revestimento são porosidade e rugosidade. Rachaduras menores significam que o revestimento de aspersão térmica tem maior força de adesão (WILDEN et al., 2006; DHIMAN et al., 2007).

No caso dos filamentos com 5 e 10% p/p de madeira não foi possível o pré-aquecimento da superfície, através de chama, para não favorecer a degradação do material, em especial das fibras de madeira, presente no compósito.

Com base nas imagens apresentadas pelo MEV, dos corpos de prova dos filamentos com 5 e 10% p/p de fibra de madeira, pode-se concluir que os filamentos com maior quantidade de madeira apresentaram melhor adesão da camada de alumínio, em virtude de ter um substrato com maior rugosidade e polaridade. Entretanto, assim como já foi verificado através do ensaio de dobramento e de tração, esta camada não conferiu reforço mecânico ao filamento. Por possuir maior percentagem de fibra, também absorve mais água, assim como já foi verificado através do ensaio de absorção de água, o que ocasionou a grande quantidade de poros no filamento, após a aspersão térmica. Sendo assim, a camada de alumínio apresentou-se mais homogênea em comparação ao revestimento do compósito com 5% p/p, porém, não apresentou reforço mecânico.

Uma fraca adesão pode ser atribuída a um pobre encravamento interfacial, a um baixo grau de metalúrgica de ligação, e elevadas tensões internas (SINGH et al., 2012; DESHPANDE et al., 2004). No caso do revestimento dos filamentos da

terceira etapa a adesão foi dificultada em virtude da baixa porosidade do substrato. Por este motivo foi necessário, além de limpeza do substrato com solvente, aumentar a velocidade do depósito para aderir alumínio ao substrato.

As partículas quando colidem com o substrato estão completamente fundidas e espalham-se radialmente na forma de discos finos. As gotas mais pequenas reagem mais facilmente com o oxigênio do que as gotas maiores, por causa da sua maior área superficial específica. Com o aumento de velocidade das partículas, que foi o necessário para esta etapa, o tamanho das gotículas diminuiu, o que foi verificado nas imagens. Assim, gotículas de tamanho pequeno tem uma grande área de superfície, durante o voo, e são oxidadas em maior grau em comparação com as gotas de tamanho grande, ocorrendo, assim, maior probabilidade de aumento de inclusões de óxidos. Por outro lado, as pequenas partículas têm velocidade maior e quanto mais velocidade maior a densidade e porosidade do revestimento (ZHU et al., 2006; EL-HADJ et al., 2010).

A partir dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura, pode-se afirmar que as micrografias revelaram informações importantes referentes à estrutura dos materiais compósitos em estudo, podendo ser correlacionadas com sua resistência mecânica.

7.7 ENSAIO DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

A diferença na quantidade de fibras de madeira nos compósitos da segunda etapa não influenciou a cristalinidade do compósito. E com relação aos filamentos da terceira etapa, e que foram tratados com temperatura a 60°C, ocorreu maior mobilidade molecular do material permitindo melhor empacotamento do compósito (PP/5% de serragem), com aumento do índice de cristalinidade (78%), se comparado aos filamentos da mesma etapa, porém, tratados a 120°C.

7.8 ENSAIO DE PERFILOMETRIA

Com base nos resultados deste estudo, verificou-se que não houve diferença significativa entre as medições de rugosidade dos filamentos da terceira etapa, os quais continham a mesma percentagem de fibras de madeira, porém, tratados em temperaturas diferentes (60°C e 120°C). Para os filamentos da segunda etapa a média de rugosidade apresentou alteração entre os filamentos com 5% p/p de madeira e os filamentos com 10% p/p de madeira, sendo que os com maior teor de fibras apresentaram média de rugosidade mais elevada.

Faz-se importante lembrar que o perfil gerado é uma convolução da ponteira com a sua amostra e, vales com diâmetro menor que a ponteira passam despercebidos pelo equipamento.

8 CONCLUSÃO

É possível produzir peças plásticas confeccionadas a partir de filamentos viscosos oriundos de uma extrusora utilizando compósitos PP/serragem de Pinus contendo 5, 10 ou 20% p/p de fibras de madeira. No entanto, a flexibilidade ideal dos filamentos para a moldagem é obtida quando a composição contendo 5% p/p de fibras de madeira é aplicada.

É possível utilizar o processo de aspersão térmica à chama em filamentos ou peças formadas por filamentos de PP/serragem de Pinus para obter revestimentos de Al ou Cu desde que a rugosidade do substrato seja suficiente, independentemente do substrato apresentar um desempenho mecânico superior ao do polipropileno. À medida que se utiliza uma maior percentagem de fibras de madeira no compósito maior é a rugosidade do material, e isso facilita o revestimento metálico através do processo de aspersão térmica à chama.

A presença de água nos compósitos PP/serragem de Pinus prejudica bastante a adesão dos revestimentos de Al, e, assim, a secagem é uma etapa essencial para peças PP/serragem formadas por filamentos que serão revestidas com Al ou Cu através do processo de aspersão térmica à chama.

A não utilização da etapa de resfriamento em água dos filamentos viscosos de compósitos PP/serragem de Pinus oriundos da extrusora não somente permite a moldagem imediata de peças formadas por filamentos, que podem apresentar design diferenciado, mas também facilita o revestimento de Al ou Cu através do processo de aspersão térmica.

A não utilização da etapa de resfriamento em água dos filamentos viscosos de compósitos PP/serragem de Pinus, oriundos da extrusora, pode alterar a cristalinidade dos substratos, se comparada à cristalinidade dos filamentos resfriados em água. No entanto, a resistência mecânica de ambos os materiais é suficiente para a formação de peças .

Apesar da resistência dos substratos de PP/serragem não interferir no revestimento metálico de Al ou Cu obtido através do processo de aspersão

térmica à chama, o tratamento térmico dos compósitos influencia muito a sua resistência mecânica. Desde que o tratamento térmico não provoque degradação térmica das fibras de madeira e/ou dos compósitos, verificado pelo escurecimento do material, a utilização de temperaturas mais altas (120°C melhor do que 60°C) durante o tratamento de filamentos, resulta na obtenção de compósitos mais resistentes.

Análises de termogravimetria (TGA) estão sendo feitas no Instituto de Química da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e vão elucidar melhor o efeito do tratamento térmico nos compósitos PP/serragem.

A obtenção de bons revestimentos metálicos de Al em substratos de compósitos contendo 5% p/p de serragem de Pinus ocorre somente quando o material apresenta uma rugosidade mais alta devido à má homogeneização do material, ou, quando o substrato passa por tratamento de superfície, através da limpeza de todas as impurezas, ou, pelo jateamento abrasivo. Como a percentagem de fibras de madeira é muito pequena, quando os compósitos estão homogêneos, a rugosidade da superfície é baixa, o que dificulta o revestimento metálico através do processo de aspersão térmica à chama.

Por outro lado, a deposição de cobre, nas amostras da terceira etapa de filamentos (com 5% p/p), apresentou resultado muito inferior ao do alcançado pelo Al, mesmo quando depositado sobre substrato que recebeu jateamento abrasivo. O Cu apenas fixou-se quando depositado sobre a camada de alumínio existente no substrato polimérico.

Os revestimentos metálicos de Al ou Cu, obtidos através do processo de aspersão térmica à chama, não resultam em reforço mecânico de filamentos ou peças, mas, contribuem para a obtenção de um aspecto metálico esteticamente desejável e que pode agregar valor à peça.

A diferença de rugosidade entre os filamentos contendo 5% p/p de serragem de Pinus e tratados a 60°C em relação aos filamentos com igual percentagem de madeira, porém, tratados a 120°C, não é significativa e não afeta a aparência dos filamentos ou de peças formadas por filamentos.

9 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Avaliação do efeito do índice de fluidez dos termoplásticos no processo de moldagem através do uso de filamentos viscosos.

Avaliação da degradação térmica das fibras de madeira, do PP e dos compósitos PP/serragem através de termogravimetria, antes e após o processo de aspersão térmica.

Avaliação do efeito do resfriamento lento dos filamentos viscosos na cristalinidade dos filamentos obtidos, comparando-os com filamentos resfriados em banho de água.

Otimização do processo de jateamento abrasivo nas peças plásticas formadas por filamentos para melhorar a adesão dos revestimentos de Al e Cu.

Avaliar a fabricação e aplicação dos filamentos em produtos diferenciados sob quatro critérios: gasto energético durante seu processo de produção; análise de seu ciclo de vida; peso do produto final; e, custos para a sua produção e comercialização.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULAZIZ S. A.; GREGORY A. B.; WILLIAM J. A. Numerical and Experimental Investigation of Cold Spray Gas Dynamic Effects for Polymer Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*. **21**, 852-862 (2012).

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2012**. Ano base 2011. Disponível em: <www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>. Acesso em 15/07/2014.

ADHIKARY, K. B.; PANG, S.; STAIGER, M. P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites: Part B*. **39**, 807–815 (2007).

ADHIKARY, B.A.; PANG, S.; STAIGER, M. P. Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with *Pinus radiata* sawdust. *Chemical Engineering Journal*. **142**, 190–198 (2008).

AFRIFAH, K.A.; HICKOK, R.A.; MATUANA, L.M. Polybutene as a matrix for wood plastic composites. *Composites Science and Technology*. **70**, 167–172 (2009).

AKCELRUD, L. **Fundamentos da Ciência dos Polímeros**. São Paulo, ed. Manole (2007).

AKIL, H.M.; OMAR, M.F.; MAZUKI, A.A.M.; SAFIEE, S.; ISHAK, Z.A.M.; BAKAR, A. A. Kenaf fiber reinforced composites: A review. *Materials and Design*. **32**, 4107–4121 (2011).

ALAMARA, K.; SABER-SAMANDARI, S.; BERNDT, C. C. Splat taxonomy of polymeric thermal spray coating. *Surface & Coatings Technology*. **205**, 5028–5034 (2011a).

ALAMARA, K.; SABER-SAMANDARI, S.; STODDART, P.R.; BERNDT, C.C. Effect of substrate temperature on the splat formation of flame sprayed polypropylene. *Surface & Coatings Technology*. **206**, 1180–1187 (2011b).

ANDRADE, C.; COUTINHO, F.; DIAS, M.; LUCAS, E.; OLIVEIRA, C.; TABAK, D. **Dicionário de polímeros**. Rio de Janeiro, ed. Interciência (2001).

ARAÚJO, J.R.; MANO, B.; SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. Polyolefin composites with curaua fibres: Effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions. *Composites Science and Technology*. **70**, 29-35 (2010).

ASHORI, A. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresource Technology*. **99**, 4661–4667 (2007).

ASHORI, A.; NOURBAKHSH, A. Characteristics of wood–fiber plastic composites made of recycled materials. *Waste Management*. **29**, 1291–1295 (2009).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS PLÁSTICOS COMPOSTOS – ABMACO. **Quem somos (2008)**. Disponível em: <[http:// www.abmaco.org.br](http://www.abmaco.org.br)>. Acesso em 25/02/2011.

ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS – ALMACO. **Compósitos**. Disponível em: <<http://www.almaco.org.br/imprensa.cfm?ID=104>>. Acesso em Abril de 2014.

ATAEEFARD, M.; MORADIAN, S. Surface properties of polypropylene/organoclay nanocomposites. *Applied Surface Science*. **257**, 2320-2326 (2010).

BAJWAA, S. G.; BAJWAB, D. S.; HOLTC, G.; COFFELT, T.; NAKAYAMA, F. Properties of thermoplastic composites with cotton and guayule biomass residues as fiber fillers. *Industrial Crops and Products*. **33**, 747–755 (2011).

BALART, J. ; FOMBUENA, V.; ESPAÑA, J.M.; SANCHEZ-NACHER, L.; BALART, R. Improvement of adhesion properties of polypropylene substrates by methyl methacrylate UV photografting surface treatment. *Materials & Design*. **33**, 1–10 (2012).

BARBOZA, A.C.R.N.; DE PAOLI, M.A., Polipropileno carregado com microesferas ocas de vidro (Glass Bubbles). *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. **12**, 130-137 (2002).

BECKER, D.; KLEINSCHMIDT, A.C.; BALZER, P.S.; SOLDI, V. Influência da Sequência de Mistura do PP-MA nas Propriedades dos Compósitos de PP e Fibra de Bananeira. *Polímeros*. **21**, 7-12 (2011).

BILLMEYER, F. W. **Textbook of Polymer Science**. 2° ed. New York, Ed. Interscience (1971).

BOUAFIF, H.; KOUBAA, A.; PERRÉ, P.; CLOUTIER, A. Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Composites: Part A*. **40**, 1975–1981 (2009).

BRADAI, M.A.; BOUNAR, N.; BENABBAS, A.; ATIA, A. Study of microstructure, phases and microhardness of metallic coatings deposited by flame thermal spray. *Journal of materials processing technology*. **200**, 410–415 (2008).

BRASKEM. **Polipropileno**. Disponível em: <http://www.braskem.com.br/upload/portal_braskem/pt/produtos_e_servicos/folha_dados/H_503_port.pdf>. Acesso em Maio de 2015.

CANTO, E.L. **Plástico: Bem Supérfluo ou mal necessário?** São Paulo, Ed. Moderna (2004).

CAUCHICK, P.; FERREIRA, C.; GOUVINHA, R.; NAVEIRO, R.; ROMEIRO, E. **Projeto de Produto**. Rio de Janeiro, ed. Elsevier (2011).

CHAHARMAHALI, M.; MIRBAGHERI, J.; TAJVIDI, M.; NAJAFI, S.K.; MIRBAGHERI, Y. Mechanical and Physical Properties of Wood-Plastic Composite Panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. **29**, 310-319 (2010).

COMISSO, T.B.; LIMA, C.A.S.; MELO, B. Estudo Experimental do Processo de Rotomoldagem de PELBD: Efeitos sobre a Morfologia e Estabilidade Dimensional. *Polímeros*. **23**, 97-107 (2013).

CONZATTI, L.; GIUNCO, F.; STAGNARO, P.; PATRUCCO, A.; MARANO, C.; RINK, M.; MARSANO, E. Composites based on polypropylene and short wool fibres. *Composites: Part A*. **47**, 165–171 (2013).

CORREA, C. A.; FONSECA, C. N. P.; NEVES, S.; RAZZINO, C. A.; HAGE, E. Compósitos Termoplásticos com Madeira. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. **13**, 154-165 (2003).

COSTA, F.B.; GOMES, H.A.S.; CAVALLI, A. Influência dos tratamentos superficiais na adesão de polipropileno utilizando adesivo a base de poliuretano. *Revista Engenho*. **9** (2014).

CRAVO, J.C.M.; SARTORI, D. L.; FIORELLI, J.; BALIEIRO, J.C.C.; JUNIOR, H.S. Painel Aglomerado de Resíduos Agroindustriais. *Ciência Florestal*, Santa Maria. **25**, 721-730 (2015).

CUI, Y.; LEE, S.; NORUZIAAN, B.; CHEUNG, M.; TAO, J. Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials. *Composites: Part A*. **39**, 655–661 (2007).

COUTINHO, F.; MELLO, I.; SANTA MARIA, L. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. **13**, 1-13 (2003).

DÁNYÁDI, L.; MÓCZÓ, J.; PUKÁNSZKY, B. Effect of various surface modifications of wood flour on the properties of PP/wood composites. *Composites: Part A*. **41** 199–206 (2010).

DARDENE, D.S. **Woodtruder System for Extrusion of Wood Fiber Polímer Composites**. Dave Murdoch, Davis Standart Corporation, 2003.

DENG, H.; REYNOLDS, C.T.; CABRERA, N.O.; BARKOULA, N.M.; ALCOCK, B.; PEIJS, T. The water absorption behaviour of all-polypropylene composites and its effect on mechanical properties. *Composites: Part B*. **41**, 268–275 (2010).

DESHPANDE, S.; KULKARNI, A.; SAMPATH, S.; HERMAN, S.H. Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering. *Surface & Coatings Technology*. **187**, 6–16 (2004).

DHIMAN, R.; MCDONALD, A.G.; CHANDRA, S. Predicting splat morphology in a thermal spray process. *Surface & Coatings Technology*. **201**, 7789–7801 (2007).

ECKERT, C.H. Market Opportunities for natural fibres in plastics composites. **Proceedings of the Wood-Plastic Conference**. p. 87-106, Baltimore, USA (2000).

EL-HADJA, A.; ZIRARI, M.; BACHAC, N. Numerical analysis of the effect of the gas temperature on splat formation during thermal spray process. *Applied Surface Science*. **257**, 1643–1648 (2010).

ENCINAS, N.; ABENOJAR, J.; MARTINEZ, M.A. Development of improved polypropylene adhesive bonding by abrasion and atmospheric plasma surface modifications. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. **33**, 1–6 (2012).

ESPERT, A.; VILAPLANA, F.; KARLSSON, S. Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. *Composites: Part A*. **35**, 1267–1276 (2004).

ESSABIR, H.; ELKHAOULANI, A.; BENMOUSSA, K.; BOUHFID, R.; ARRAKHIZ, F.Z.; QAISS, A. Dynamic mechanical thermal behavior analysis of doum fibers reinforced polypropylene composites. *Materials and Design*. **51**, 780–788 (2013).

FABIYI, J.; MCDONALD, A.; MORRELL, J.; FREITAG, C. Effects of wood species on durability and chemical changes of fungal decayed wood plastic composites. *Composites: Part A*. **42**, 501–510 (2011).

FARUK, O.; BLEDZKI, A.; FINK, H.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers, *Progress in Polymer Science*. **37**, 1552-1596 (2012).

FARUK, O.; MATUANA, L. M. Nanoclay reinforced HDPE as a matrix for wood-plastic composites. *Composites Science and Technology*. **68**, 2073–2077 (2008).

FINKLER, M.; SCAPINI, P.; FREIRE, E.; ZATTERA, A.; ZENI, M. Compósitos de HDPE/fibras têxteis. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. **15**, 171-175 (2005).

GANESAN, A.; AFFI, J.; YAMADA, M.; FUKUMOTO, M. Bonding behavior studies of cold sprayed copper coating on the PVC polymer substrate. *Japan. Surface & Coatings Technology*. **207**, 262–269 (2012).

GAO, H.; XIE, Y.; OU, R.; WANG, Q. Grafting effects of polypropylene / polyethylene blends with maleic anhydride on the properties of the resulting wood-

plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. **43**, 150-157 (2012).

GOMATHI, N.; NEOGI, S. Surface modification of polypropylene using argon plasma: Statistical optimization of the process variables. *Applied Surface Science*. **255**, 7590–7600 (2009).

GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, C.; GONZÁLEZ-QUESADA, M.; DE LA ORDEN, U.; MARTÍNEZ URREAGA, J. Comparison of the Effects of Polyethylenimine and Maleated Polypropylene Coupling Agents on the Properties of Cellulose-Reinforced Polypropylene Composites. *Journal of Applied Polymer Science*. **110**, 2555–2562 (2008).

Harris, A.F.; Beevers, A. The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. **19**, 445-452 (1999).

HARTE, A.M.; NAMARAB, J.F. Overinjection of thermoplastic composites. Processing and testing of components. *Journal of Materials Processing Technology*. **182**, 12–20 (2007).

HEDRICK, T. E.; BICKMAN, L.; ROG, D. J. Applied research design. A practical guide. Newbury Park, CA: **Sage** (1993).

HILLIG, E.; IWAKIRI, S.; ANDRADE, M. Z.; ZATTERA, A. J. Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira. *Revista Árvore*. **32**, 299-310 (2008).

HILLIG, E.; SCHNEIDER, V.E.; PAVONI, E. T. Geração de resíduos de madeira e derivados da indústria moveleira em função das variáveis de produção. *Production*. **19** (2009).

HUANG, W.; FAN, X.; ZHAO, Y.; ZHOU, X.; MENG, X.; ZOU, B.; CAO, X.; WANG, Z. Fabrication of thermal barrier coatings onto polyimide matrix composites via air plasma spray process. *Surface & Coatings Technology*. **207**, 421–429 (2012).

ISMAIL, H.; HAMID ABDULLAH, A.; ABU BAKAR. Kenaf Core Reinforced High-density Polyethylene/Soya Powder Composites: The Effects of Filler Loading and Compatibilizer. *Journal of reinforced plastics and composites*. **29**, 2489-2497 (2010).

JOHN, V. M.; RODOLFO-JR, A. Desenvolvimento de PVC reforçado com resíduos de pinus para substituir madeira convencional em diversas aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. **16**, 1-11 (2006).

JORDAN, N.; SCHRÖDER, R.; HARIG, H.; KIENZLER, R. Influences of the spray deposition process on the properties of copper and copper alloys. *Materials Science and Engineering, A*. **326**, 51–62 (2002).

KIM, J.; KIM, K.S.; KIM, Y.H. Mechanical effects in peel adhesion test. *Joint Adhesives Science Technologies*. **3**, 175-187 (1989).

KIM, S.; MOONB, J.; KIM, G.; HA, C. Mechanical properties of polypropylene/natural fiber composites: Comparison of wood fiber and cotton fiber. *Polymer Testing*. **27**, 801–806 (2008).

KIM, W.; YUN, H.; LEE, J.; JUNG, H. Evaluation of mechanical inter lock effect on adhesion strength of polymer–metal interfaces using micro patterned surface topography. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. **30**, 408–417 (2010).

KOENIG, K.M.; SYPKENS, C.W. Wood-plastic composites vie for market share. *Wood and Wood Products*. **107**, 49-58 (2002).

KOSAKA, P.; KAWANO, Y.; PETRI, H.; FANTINI, M.; PETRI, D. Estructure and properties of composites of polyethylene or maleated polyethylene and cellulose or cellulose esters. *Journal of applied polymer science*. **103**, 402-411 (2007).

KOUT, A.; WIEDERKEHR, T.; MÜLLER, H. Efficient stochastic simulation of thermal spray processes. *Surface & Coatings Technology*. **203**, 1580–1595 (2009).

KU, H.; WANG, H.; PATTARACHAIYAKOOP, N.; TRADA, M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites: Part B*. **42**, 856–873 (2011).

KUO, P.; WANG, S.; CHEN, J.; HSUEH, H.; TSAI, M. Effects of material compositions on the mechanical properties of wood–plastic composites manufactured by injection molding. *Materials and Design*. **30**, 3489–3496 (2009).

LA MANTIA, F.P.; MORREALE, M. Green composites: A brief review. *Composites: Part A*. **42**, 579–588 (2011).

LEE, N.C. **Blow Molding Design Guide**. Munich, Editora Hanser (1998).

LEU, S.; YANG, T.; LO, S. Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood–plastic composites (WPCs). *Construction and Building Materials*. **29**, 120–127 (2011).

LI, Z.; SHEN, J.; CAO, F.; LI, Q. A high strength and high conductivity copper alloy prepared by spray forming. *Journal of Materials Processing Technology*. **137**, 60–64 (2003).

LU, J.Z.; WU, Q.; NEGULESCU, I.I. The influence of maleation on polymer adsorption and fixation, wood surface wettability, and interfacial bonding strength in wood-PVC composites. *Wood and Fiber Science*. **34**, 434-459 (2002).

LUPOI, R.; O'NEILL, W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray. *Surface & Coatings Technology*. **205**, 2167–2173 (2010).

MACHADO, A.; COVAS, J.; VAN DUIN, M. Effect of polyolefin structure on maleic anhydride grafting. *Polymer*. **42**, 3649–3655 (2001).

MARKARIAN, J. Additive developments aid growth in wood-plastic Composites. *Plastics Additives & Compounding*. **4**, 18-21 (2002).

MOITA NETO, J.M. **Molhamento e Ângulo de Contato**. São Paulo: Publindustria (2006).

MORESCO, M. **Efeito de Agente de Acoplamento em Compósitos de Polipropileno com Cargas Vegetais**. Rio Grande do Sul (2009).

MSPC - Informações Técnicas. Disponível em:
<<http://www.mspc.eng.br/unid/par.shtml>>. Acesso em 05/05/2015.

NAKATANI, H.; HASHIMOTO, K.; MIYAZAKI, K.; TERANO, M. Cellulose/Syndiotactic Polypropylene Composites: Effects of Maleated Polypropylene as a Compatibilizer and Silanized Cellulose on the Morphology and Tensile Properties. *Journal of Applied Polymer Science*. **113**, 2022–2029 (2009).

NALDONY, P.; FLORES-SAHAGUN, T.H.S.; SATYANARAYANA, K.G. Effect of the type of fiber (coconut, eucalyptus or pine) and compatibilizer on the properties of extruded composites of recycled high density polyethylene. *J. Compos Mater* (2015).

NING, H.; VAIDYA, U.; JANOWSKI, G. M.; HUSMAN, G. Design, manufacture and analysis of a thermoplastic composite frame structure for mass transit. *Composite Structures*. **80**, 105–116 (2007).

NOURBAKHSH, A.; ASHORI, A. Wood plastic composites from agro-waste materials: Analysis of mechanical properties. *Bioresource Technology*. **101**, 2525–2528 (2010).

PACKHAM, D.E. Surface energy, surface topography and adhesion. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. **23**, 437–448 (2003).

PAREDES, R. S. C. **Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha**. Tese de doutorado, UFSC. Santa Catarina (1998).

PAREDES, R. S. C. **Apostila de Aspersão Térmica**. UFPR (2009).

PAREDES, R. S. C.; AMICO, S.C.; D'OLIVEIRA, A.S.C.M. The effect of roughness and pre-heating of the substrate on the morphology of aluminium coatings

deposited by thermal spraying. *Surface & Coatings Technology*. **200**, 3049 – 3055 (2005).

PAREDES, R. S. C.; RODRIGUEZ, R. M. H. P.; WIDO, S. H.; CALIXTO, ALFREDO. Comparison of aluminum coatings deposited by flame spray and by electric arc spray. *Surface & Coatings Technology*. **202**, 172–179 (2007).

PIERLOT, C.; PAWLOWSKI, L.; BIGAN, M.; CHAGNON, P. Design of experiments in thermal spraying: A review. *Surface & Coatings Technology*. **202**, 4483–4490 (2008).

POCIUS, A. V. **Adhesion and adhesives technology: An introduction**. New York, Hanser Publisher (1997).

QIU, W.; ENDO, T.; HIROTSU, T. A novel technique for preparing of maleic anhydride grafted polyolefins. *European Polymer Journal*. **41**, 1979–1984 (2005).

RANADE, A.; NAYAK, K.; FAIRBROTHER, D.; D'SOUZA, N. Maleated and non-maleated polyethylene–montmorillonite layered silicate blown films: creep, dispersion and crystallinity. *Polymer*. **46**, 7323–7333 (2005).

RIBEIRO, I.; PEÇAS, P.; HENRIQUES, E. Incorporating tool design into a comprehensive life cycle cost framework using the case of injection molding. *Journal of Cleaner Production*. **53**, 297–309 (2013).

RODRIGUEZ, R. M. H. P. **Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica**. Tese de doutorado, UFPR. Paraná (2003).

SALIMI, A.; MIRABEDINI, M.; ATAI, M.; MOHSENI, M.; NAIMI-JAMAL, M.R. Correlating the adhesion of an acrylic coating to the physico-mechanical behavior of a polypropylene substrate. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. **31**, 220–225 (2011).

SALMAH, H.; AZIEYANTI, A.N. Properties of recycled polyethylene/chitosan composites: the effect of polyethylene-graft-maleic anhydride. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. **30**, 195–202 (2010).

SANTOS, L.P. **Otimização da preparação de polipropileno maleatado via extrusão reativa para reforço mecânico em compósitos**. Dissertação de Mestrado, UFPR. Paraná (2011).

SANTOS, L.P.; FLORES-SAHAGUN, T.H.; SATYANARAYANA, K.G. Effect of processing parameters on the properties of polypropylene-sawdust composites. *J. Compos Mater* (2015).

SANTOS, L.P.; TROMBETTA, E.; FLORES-SAHAGUN, T.H.; SATYANARAYANA, K.G. Effect of domestic compatibilizer on the performance of polypropylene-sawdust composites. **J. Compos Mater** (2015).

SCHUT, J.H. For compounding, sheet & profile, wood is good. *Plastics Technology*. **45**, 46–47 (1999).

SHESHMANI, S.; ASHORI, A.; HAMZEH, Y. Physical Properties of Polyethylene-Wood Fiber-Clay Nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*. **118**, 3255–3259 (2010).

SILVA, L.; MAGALHÃES, A.; MOURA, M. **Juntas Adesivas Estruturais**. Porto, Publindustria (2007).

SINGH, H.; GREWAL, H.S.; AGRAWAL, A. Microstructural and mechanical characterization of thermal sprayed nickel–alumina composite coatings. *Surface & Coatings Technology*. **216**, 78–92 (2012).

SPINACÉ, M.; DE PAOLI, M. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química Nova*. **28** (2005).

SOURY, E.; BEHRAVESH, A.H.; ROUHANI ESFAHANI, E.; ZOLFAGHARI, A. Design optimization and manufacturing of wood–plastic composite pallet. *Materials and Design*. **30**, 4183–4191 (2009).

SUDHAKARA, P.; KAMALA, D.A.P.; PRASAD, V.C.; REDDY, O.K.; WOO, D.L.; KIM, B.S.; SONG, J.I. Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Maleated Polypropylene Compatibilized Borassus Fruit Fiber/Polypropylene Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* **128**, 976–982 (2013).

TAMRAKAR, S.; LOPEZ-ANIDO, R. A.; KIZILTAS, A.; GARDNER, D. J. Time and temperature dependent response of a wood–polypropylene composite. *Composites: Part A*. **42**, 834–842 (2011).

TROMBETTA, E. **Utilização de fibra natural de Pinus (Serragem) como reforço em componentes automotivos compostos de polipropileno**. Dissertação de Mestrado. Paraná (2010).

YANG, HAN-SEUNG.; KIM, H.; PARK, H.; LEE B.; HWANG, T. Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler–polyolefin bio-composites. *Composite Structures*. **72**, 429–437 (2006).

YANG, H.; WOLCOTT, M.; KIM, S.; KIM, H. Effect of different compatibilizing agents on the mechanical properties of lignocellulosic material filled polyethylene bio-composites. *Composite Structures*. **79**, 369–375 (2007).

YEH, S.; GUPTA, R. K. Improved wood–plastic composites through better processing. *Composites: Part A*. **39**, 1694–1699 (2008).

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*. **63**, 1259–1264 (2003).

WECHSLERA, A.; HIZIROGLUB, S. Some of the properties of wood–plastic composites. *Building and Environment*. **42**, 2637–2644 (2006).

WILDEN, J.; FRANK, H.; BERGMANN, J.P. Process and microstructure simulation in thermal spraying. *Surface & Coatings Technology*. **201**, 1962–1968 (2006).

YIN, R. **Estudos de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. São Paulo: Ed. Bookman (2001).

ZABIHZADEH, S.M.; DASTOORIAN, F.; EBRAHIMI, G. Effect of MAPE on Mechanical and Morphological Properties of Wheat Straw/HDPE Injection Molded Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. **29**, 123–131 (2010).

ZABIHZADEH, S.M.; DASTOORIAN, F.; EBRAHIMI, G. Effect of Wood Species and Coupling Agent on Mechanical Properties of Wood Flour/HDPE Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. **29**, 1146–1152 (2009).

ZAMPALONI, M.; POURBOGHRAT, F.; YANKOVICH, S.A.; RODGERS, B.N.; MOORE, J.; DRZAL, L.T.; MOHANTY, A.K.; MISRA, M. Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions. *Composites: Part A*. **38**, 1569–1580 (2007).

ZHANG, M.; COLBY, R.H.; MILNER, S.T.; CHUNG, T.C. Synthesis and Characterization of Maleic Anhydride Grafted Polypropylene with a Well-Defined Molecular Structure. *Macromolecules*. **46**, 4313–4323 (2013).

ZHAO, Q.; ZHANGA, B.; QUANA, H.; YAMB, R.; YUENC, K.K.; LIA, R.K.Y. **Retardante de chama de casca de arroz cheio de ecompositos polietileno de alta densidade**. Hong Kong (2009).

ZHU, Y.; LIAO, H.; CODDET, C. Transient thermal analysis and coating formation simulation of thermal spray process by finite difference method. *Surface & Coatings Technology*. **200**, 4665–4673 (2006).